Jukka Hatakka
Heikki Saari
Jarmo Sirviö
Jouni Viiri
Sari Yrjänäinen

Sanoma Pro Oy
Helsinki

Aine ja säteily

Physica

Tiedustelut
Sanoma Pro Oy, Helsinki
puh. 020 391 000
sähköposti: asiakaspalvelu@sanomapro.fi

www.sanomapro.fi

Kustantaja: Sanoma Pro Oy

Tämä aineisto on digitaalinen rinnakkaisversio tuotteesta
ISBN 978-995-63-1405-1 Physica 8

12 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2367-1
48 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2368-8

Toimitus: Eero Taipalus, Marja Saarenvesi
Ulkoasu ja kansi: Liisa Holm
Taitto: Eija Högman ja Sari Jeskanen
Kuvitus: Picman Oy / Pekka Könönen
Kuvatoimitus: Anita Kokkila ja tekijät

© Jukka Hatakka, Heikki Saari, Jarmo Sirviö, Jouni Viiri,
Sari Yrjänäinen ja Sanoma Pro Oy

Kopiointiehdot
Tämä teos on digitaalinen oppikirja, joka on suojattu tekijänoikeuslailla (404/61).

Lukijalle

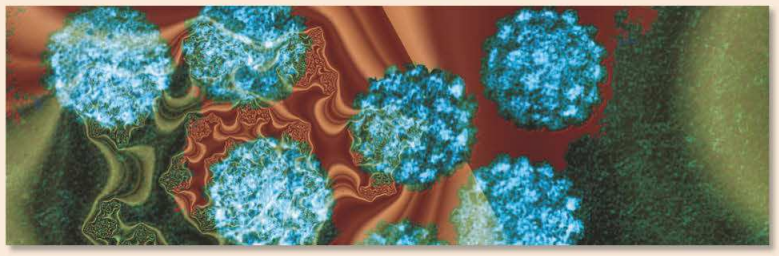
Physica 8 on oppikirja lukion fysiikan kahdeksannelle kurssille, joka on fysiikan seitsemäs syventävä kurssi. Fysiikan syventävät kurssit muodostavat kokonaisuuden, jossa käydään läpi fysiikan keskeiset osa-alueet. Kahdeksas kurssi, aine ja säteily, käsittelee modernia fysiikkaa. Tällä kurssilla opiskeltavia asioita ovat aineen rakenne, energian kvantittuminen ja siihen liittyviä ilmiöt, dualismi, aineen ja energian ekvivalenssi sekä radioaktiivisuus ja ydinreaktiot.

Tässä kirjassa fysiikkaa käsitellään muiden Physica-sarjan kirjojen tavoin monien erilaisten mallien avulla. Käsitteiden oikeaan määrittelemiseen ja mallien harkittuun käyttöön on tässä kirjassa kiinnitetty erityistä huomiota. Atomimallin kehittyminen syventää opiskelijoiden kokonaiskuvaa fysiikan kehityksestä. Energian kvantittuminen, aineen ja energian ekvivalenssi sekä hiukkasfysiikka avaavat oven nykyfysiikan ymmärtämiselle. Kirjan luku kahdeksan johdattelee opiskelijan fysiikan uusimpien ajatusten ääreen.

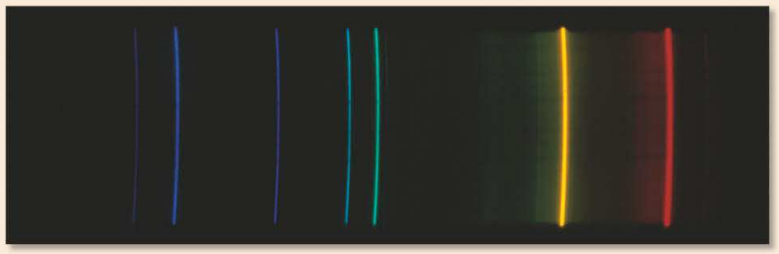
Fysiikan syventävien kurssien yhtenä keskeisenä tavoitteena on antaa valmiuksia lukion jälkeisiin opintoihin luonnontieteellisillä ja luonnontieteitä soveltavilla aloilla.

Joensuussa, Jyväskylässä, Oulussa, Tuusulassa ja Ylöjärvellä
10.6.2007
Tekijät

Sisällys



Aine ja säteily 6

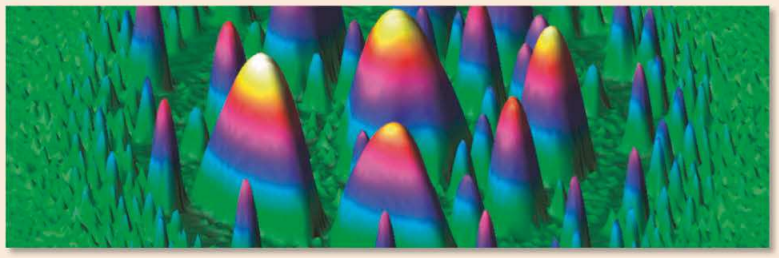


1 Kvantittuminen muutti käsityksen luonnonilmiöistä 8

1.1 Sähkömagneettinen säteily ... 8
Valon emissio ja absorptio ... 9
Emissiospektri ... 10
Absorptiospektri ... 11

1.2 Säteilijän energia on kvantittunut ... 13
Musta kappale on säteilijää kuvaava malli ... 13
Einsteinin valon kvanttiteoria ... 15

1.3 Valosähköilmiö ... 18
Comptonin sironta ... 23
Tehtäviä ... 26



2 Säteilyä ja ainetta kuvataan useilla malleilla 28

2.1 Röntgensäteily ... 28
Jarrutussäteily ... 30
Röntgendiffraktio ... 32

2.2 Aaltohiukkasdualismi ... 35
Hiukkasilla on myös aaltoluonne ... 35
Valon ja elektronien käyttäytyminen kaksoisraossa ... 36
Elektronisironta metallista ... 37

2.3 Aineen ja säteilyn duaalinen malli ... 40
Hiukkas- ja aaltomalli ... 40
Duaalinen malli ... 40
Tehtäviä ... 42

3 Atomin malli 44

3.1 Varhaiset atomimallit ... 44
Thomsonin atomimalli ... 44
Rutherfordin koe ja atomimalli ... 45
Vedyn spektri ... 47
Bohrin vetyatomimalli ... 49

3.2 Energiatasokaavio, virittyminen ja purkautuminen ... 52
Kvanttimekaaninen atomimalli ... 55
Atomin kuorimalli selittää alkuaineiden kemialliset ominaisuudet ... 56

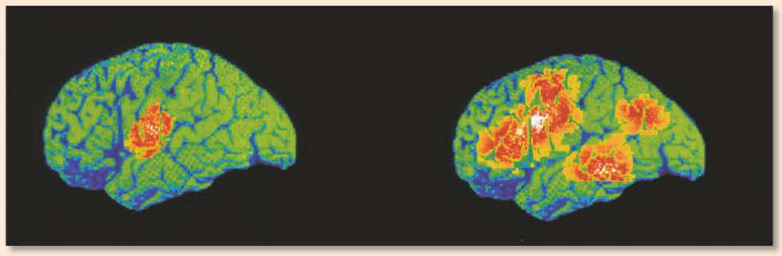
3.3 Kvanttimekaanisia ilmiöitä ... 58
Fluoresenssi ja fosforenssi ... 59
Laser ... 61
Karakteristinen röntgensäteily ... 63
Tehtäviä ... 66

4 Atomin ydin 70

4.1 Ytimen rakenne ... 70
Ydinvoima ... 71
Ydintä kuvaavat suureet ... 72

4.2 Isotoopit ... 73
Atomimassayksikkö ... 74

4.3 Massavaje ja sidosenergia ... 75
Massa ja energia ... 77
Sidosenergia ja sidososuus ... 77
Tehtäviä ... 81

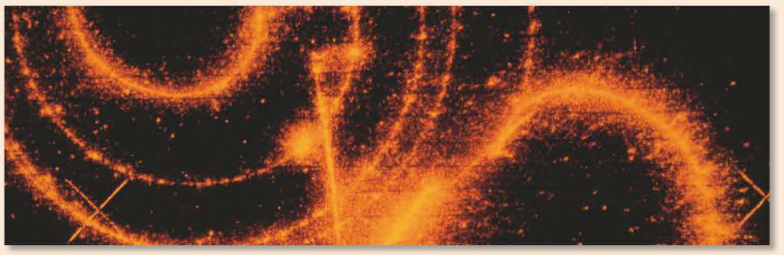


5 Radioaktiivisuus 82

5.1 Radioaktiivisen aineen ydin lähettää säteilyä 82
Alfahajoaminen 85
Beetahajoaminen 89
Elektronisieppaus (EC) ja spontaani fissio 91
Gammasäteily 93
5.2 Hajoamislaki 94
5.3 Säteilyn mittaaminen ja säteilyturvallisuus 99
Säteilyilmaisimet 99
Säteilyyn liittyvät suureet ja niiden yksiköt 100
Säteily ja ihminen 101
Säteilyn lääketieteellinen käyttö 102
Säteilyn käyttö teollisuudessa 102
Säteilyturvallisuus 103
Gammasäteilyn heikkeneminen 103
Tehtäviä 106

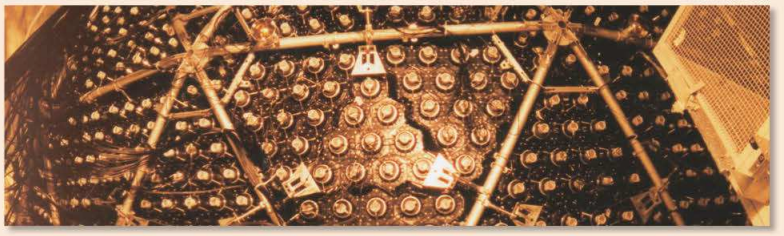
6 Ydinreaktiot 110

6.1 Ydinreaktiotyypit 110
Ydinreaktion energia 110
Ydinfissio 111
Ketjureaktio 112
Ydinfuusio 113
6.2 Fissioydinvoimalat 115
Fissiovoimalan pääperiaate 115
Erilaiset reaktorityypit 115
Ydinvoimalaitoksen turvajärjestelyt 118
Ydinaseet 119
6.3 Fuusio tähdissä ja ydinvoimaloissa 121
Fuusio tähdissä 121
Fuusio tulevaisuuden energianlähteenä 122
Tehtäviä 127



7 Hiukkasfysiikka 130

7.1 Fysiikan hiukkaset 130
Alkeishiukkaset 131
Perusvuorovaikutukset 133
7.2 Hiukkastutkimus 134
Hiukkasilmaisimet 134
Hiukkaskiihdyttimet 135
Törmäyttimet 136
7.3 Suppea suhteellisuusteoria 137
Aikadilaatio 138
Pituuskontraktio 139
Nopeasti liikkuvien hiukkasten liikemäärä ja liike-energia 142
Tehtäviä 145



© Jukka Maalampi

8 Hiukkasfysiikan ja kosmologian haasteet 148

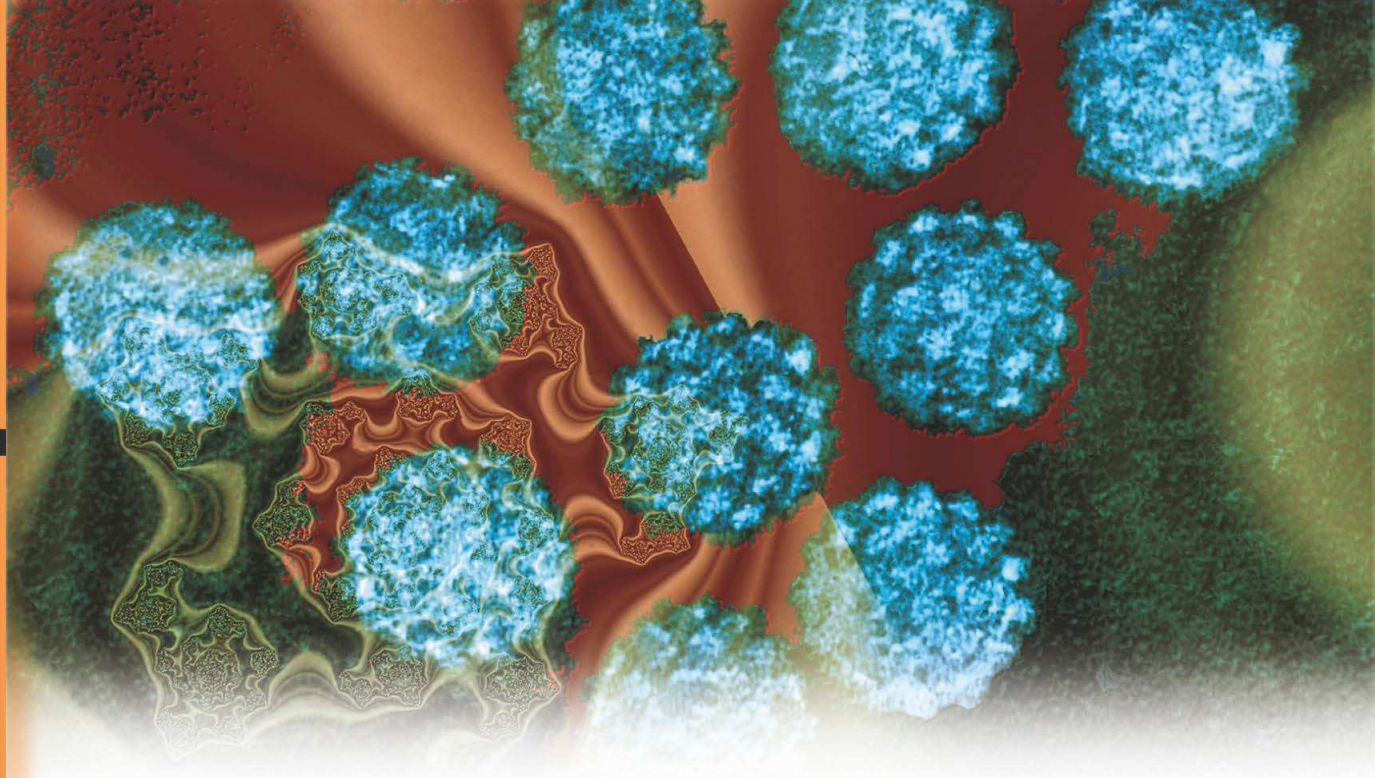
8.1 Hiukkasfysiikan standardimalli 148
Välittäjähiukkaset 149
Vuorovaikutuksen kantama 149
Sähkömagneettinen vuorovaikutus 149
Vahva vuorovaikutus 150
Heikko vuorovaikutus 150
8.2 Hiukkasfysiikan avoimia kysymyksiä 152
Massan arvoitus 152
Supersymmetria 152
Gravitaatio 153
Supersäikeet 155
8.3 Kosmologia tutkii maailmankaikkeutta 156
Maailmankaikkeuden laajeneminen 156
Maailmankaikkeuden historia 160
Kosmologian avoimia kysymyksiä – pimeä aine ja pimeä energia 165

Kertaustehtäviä 166
Tehtävien vastaukset 170
Hakemisto 172
Nuklidikartat 174
Valokuvien lähteet 178

Aine ja säteily

Tekniikka, joka perustuu klassiseen fysiikkaan, mahdollisti ihmisen lähettämisen Kuun pinnalle. Klassisen fysiikan avulla ei kuitenkaan pystytty selittämään kaikkia luonnon ilmiöitä. Aineen rakenne ja vuorovaikutus säteilyn kanssa osoittautuivat 1800-luvun lopussa luonnonilmiöiksi, joiden selittämiseen tarvittiin uutta tietoa. Tapahtui modernin fysiikan läpimurto, joka mahdollisti myös ihmisen elämää helpottavien keksintöjen vyöryn.

Tässä kurssissa tutustutaan kvantittumiseen ja dualismiin sekä opiskellaan aineen rakennetta.

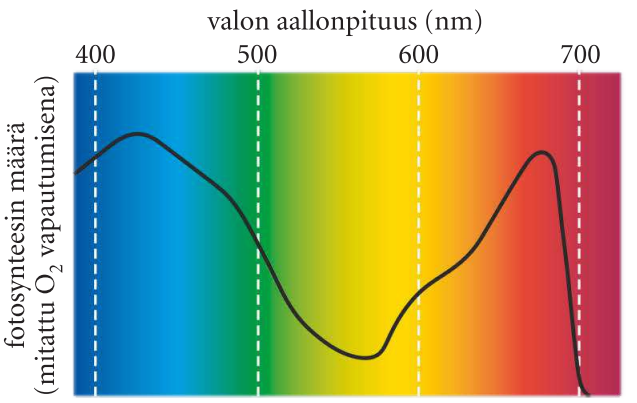


Klassisen fysiikan mukaan luonnonilmiöt selitetään vuorovaikutusten, kenttien ja aaltoliikkeen avulla. Pesäpallon ja mailan vuorovaikutus tuntuu lyönnin aikana niin mailaa pitelevässä kädessä kuin pallossakin. Varattujen hiukkasten liikettä voidaan ohjata sähkö- ja magneettikentillä, ja valo aaltona diffraktoituu hilassa.

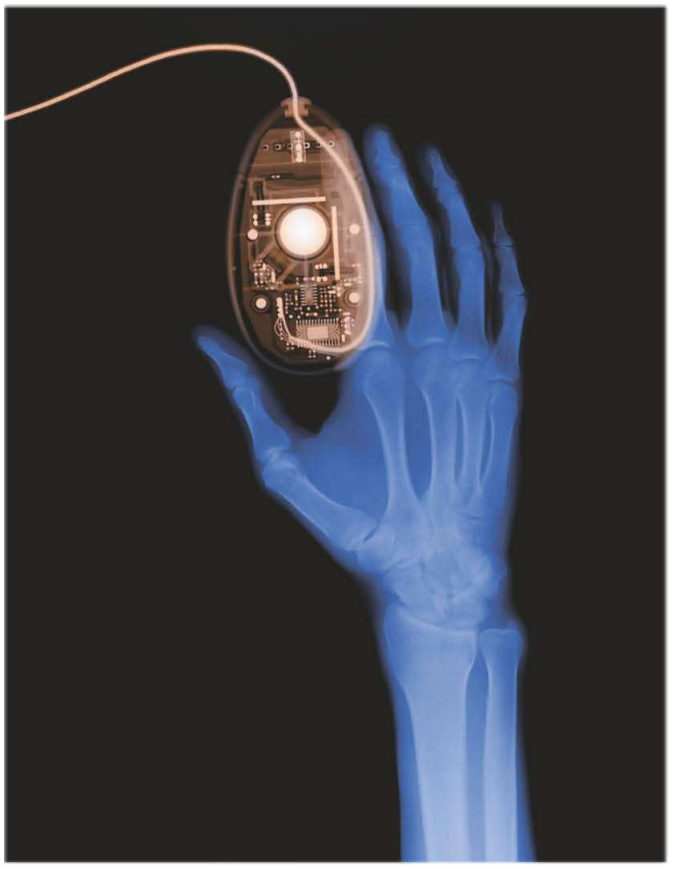
Atomimaailman mittasuhteet ovat ihmiselle käsittämättömän pieniä. Klassisen fysiikan käyttämät konkreettisiin mielikuviin perustuvat mallit, kappale ja aalto, eivät riitä kuvaamaan näitä atomaarisia ilmiöitä ja kohteita. Niiden lisäksi tarvitaan matemaattisia malleja, jotka kuvaavat havaittuja ilmiöitä. Nämäkin mallit perustuvat havaintoihin. Havaintojen paljastamassa mikromaailman todellisuudessa on piirteitä, joita ei makroskooppisessa maailmassa ole.

Seuraavissa kuvissa on esitelty joitain tämän fysiikan kurssin keskeisiä sisältöjä.

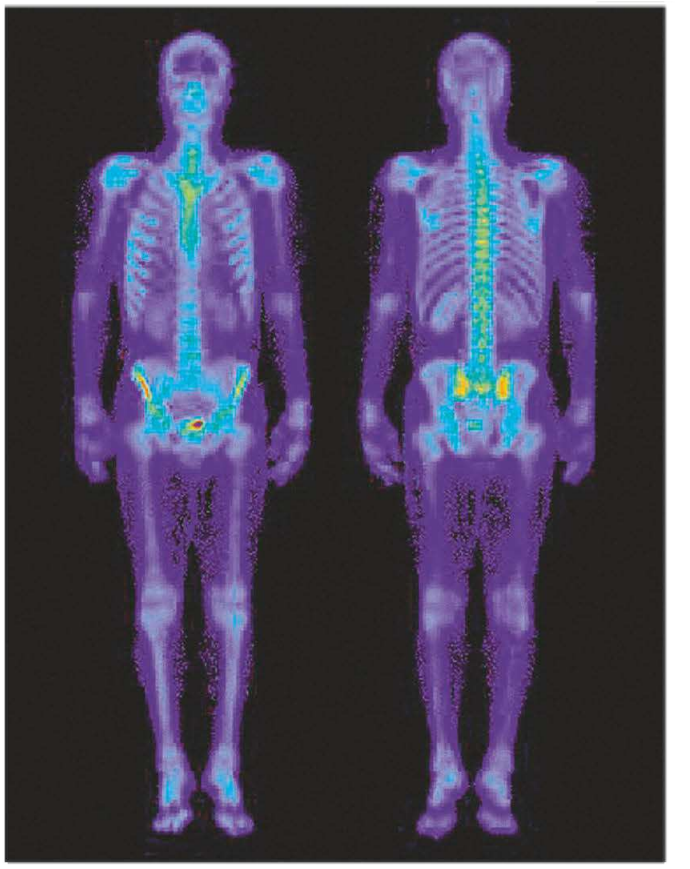
▲ Monien tautien aiheuttajat olivat aikanaan lääketieteellinen mysteeri. Fysiikan kehittyminen toi mahdollisuuden päästä näkemään yhä pienempiä rakenteita. Elektronimikroskooppi paljasti tautien aiheuttajiksi virukset. Elektronimikroskoopissa valo on korvattu elektronisuihkulla. Sopivassa magneettikentässä elektronisuihku käyttäytyy kuin valo linssissä.



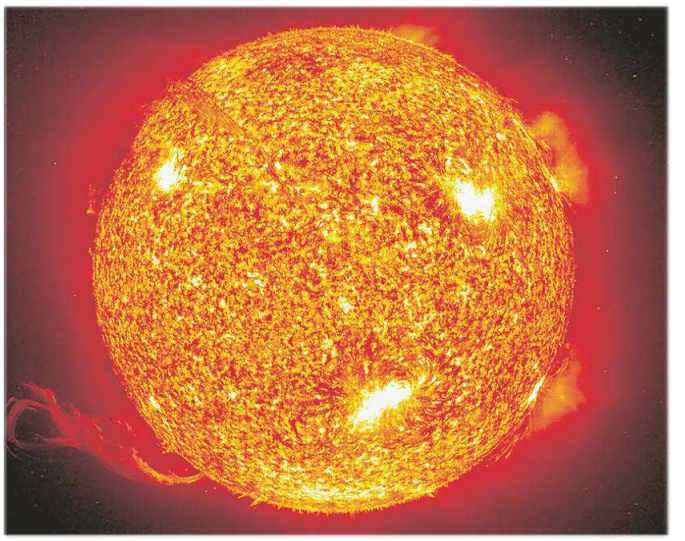
◀ Fotosynteesi kuvattiin Physica 1 -kirjassa prosessiksi, jossa Auringon säteilyenergiaa varastoituu kasvin kemialliseksi energiaksi. Tässä kurssissa opitaan, että kyseessä on säteilyn ja aineen vuorovaikutus. Auringon lähettämä sininen ja punainen valo virittää yhteyttämisväriaineiden molekyylejä, kuten klorofylliä, ja energiaa sitoutuu. Sen sijaan vihreä valo ei viritä näitä molekyylejä. Vihreä valo heijastuu lehdistä, ja siksi ne näyttävät vihreiltä.



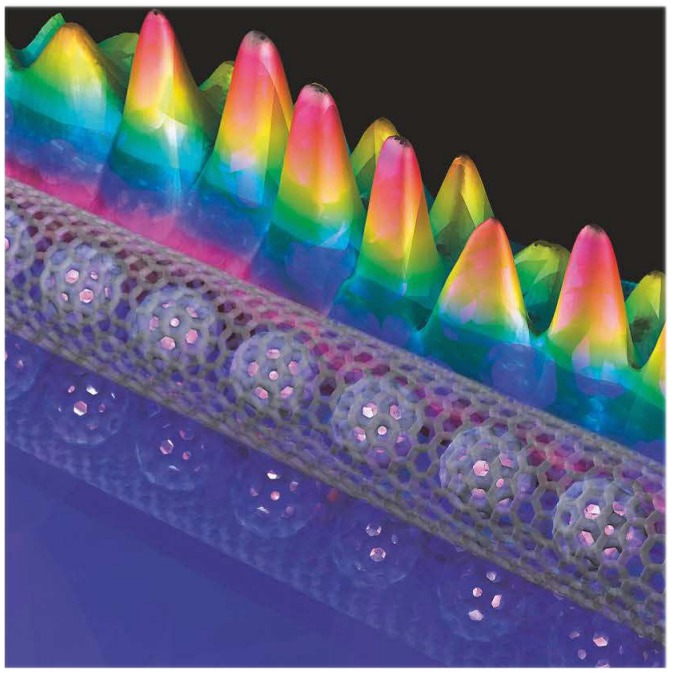
▲ **Röntgensäteilyn aallonpituus on hyvin pieni. Se on läpitunkevaa sähkömagneettista säteilyä, jota syntyy muun muassa, kun elektronisuihku osuu metallikohtioon. Röntgensäteilyä käytetään esimerkiksi lääketieteellisissä kuvauksissa.**



▲ **Radioaktiivisuus yhdistetään usein pelkästään negatiivisiin asioihin, kuten ydivoimalaonnettomuuksiin. Radioaktiivisuudella on kuitenkin monia ihmisen hyvinvointia ja turvallisuutta edistäviä sovelluksia. Radioaktiivisia säteilijöitä käytetään esimerkiksi kotona palovaroittimissa ja teollisuuden laaduntarkkailussa. Terveydenhuollossa esimerkiksi luuston isotooppikartoitus ja syövän säteilytyshoito perustuvat radioaktiivisuuteen.**



▲ **Auringon energiantuotto perustuu fuusioreaktioon, jossa kevyet vety-ytimet yhtyvät raskaammiksi heliumytimiksi. Samalla vapautuu runsaasti energiaa. Elämä maapallolla on mahdollista ainoastaan Auringosta tulevan energian vuoksi. Tutkijat kehittävät energiantuotantoon fuusiovoimalaa, joka toimisi samalla periaatteella kuin energia syntyy Auringossa. Fuusio ratkaisisi ihmiskunnan tulevaisuuden energiaongelmat. Tällä hetkellä ydivoimaloissa energiaa tuotetaan fissiolla, jossa raskaat atomiytimet hajoavat kevyemmiksi, ja samalla vapautuu energiaa.**



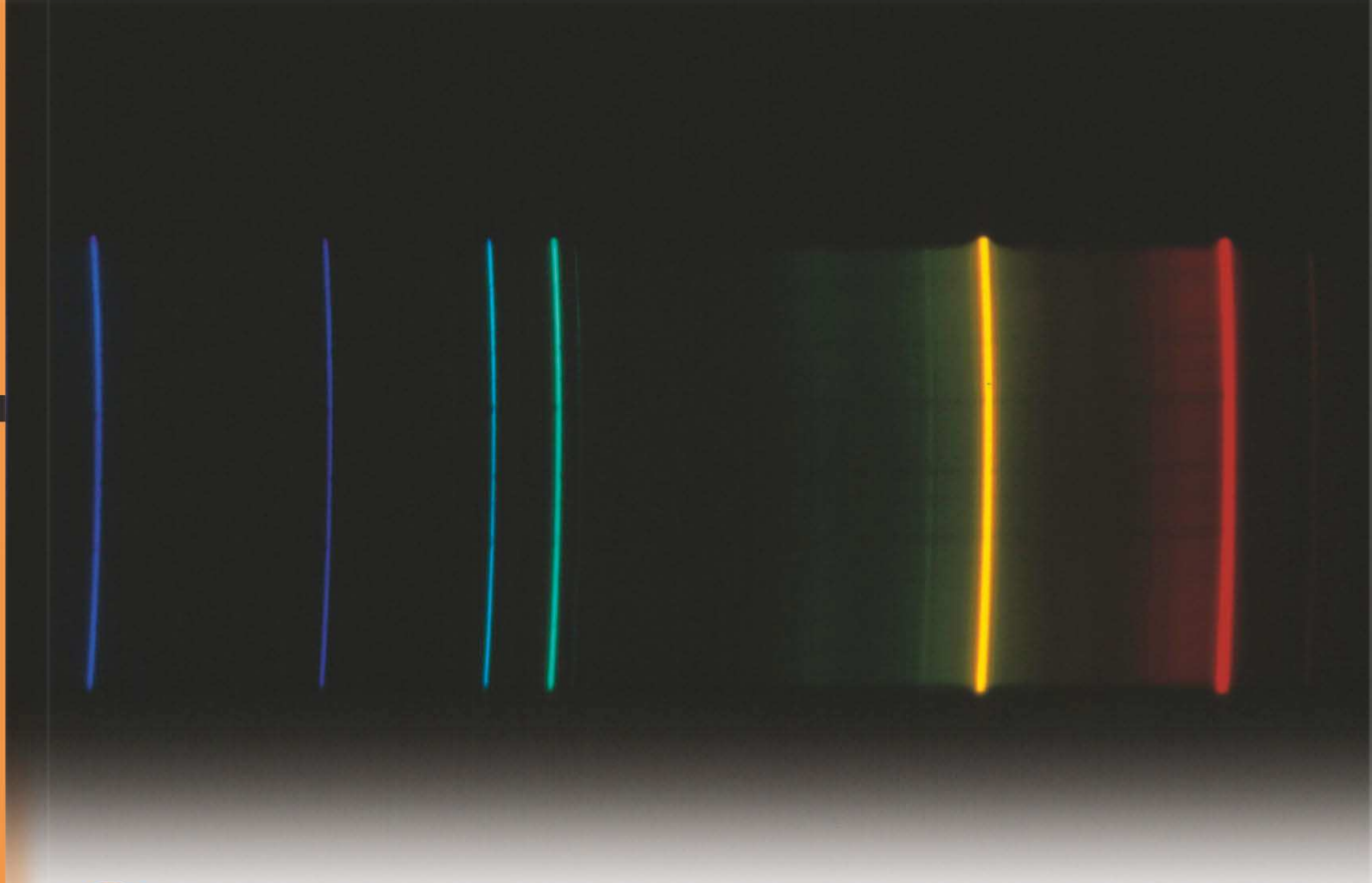
▲ **Nanoteknologia käsittelee kooltaan 1 … 100 nanometriä olevia rakenteita. Tällaisista rakenteista koottujen laitteiden pieni koko avaa aivan uusia mahdollisuuksia. Nanoteknologiaan perustuvia laitteita voidaan tulevaisuudessa käyttää sekä terveydenhuollossa että teollisuudessa. Terveyttä seuraava verisuonistoon asetettu nanorobotti ei ole enää science fictionia vaan vakavan tutkimuksen ja kehitystyön kohde.**

1

Kvantittuminen muutti käsityksen luonnonilmiöistä

1900-luvun alussa läheskään kaikki fyysikot eivät uskoneet atomien olemassaoloon. Muutamassa vuodessa tapahtui kuitenkin merkittävä mullistus, joka muutti käsityksen aineen rakenteesta.

Tässä luvussa tutustutaan spektreihin ja valon kvanttiteoriaan. Nämä seikat avasivat oven aineen rakenteen ymmärtämiseen.



▲ **Kaasun lähettämää viivaspektriä ei pystytty selittämään klassisen fysiikan teorioiden avulla. Kuvassa on heliumin näkyvän alueen emissiospektri.**

1.1 Sähkömagneettinen säteily

Newtonin mekaniikassa tarkastellaan sellaisia ilmiöitä, joissa kappaleiden liiketilan muutokset selitetään kappaleiden välisten vuorovaikutusten avulla. Kappaleina voidaan pitää niin taivaankappaleita kuin pölyäkin. Kenttien avulla selitetään esimerkiksi sähkömagneettisia ilmiöitä.

Klassisen fysiikan selitysmallit

Luonnonilmiöt selitetään klassisen fysiikan mukaan joko kappaleiden vuorovaikutusten tai kenttien avulla.

Maxwell, Hertz ja monet muut fyysikot osoittivat, että valo on sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily on aaltoliikettä, jonka aallonpituus vaihtelee säteilyn syntytavan mukaan äärimmäisen lyhyestä mielivaltaisen pitkään. Näkyvän valon aallonpituus on noin 400–700 nm. Sähkömagneettiseen kenttään liittyviä ilmiöitä käsiteltiin Sähkömagnetismi-kurssissa.

Valon aaltoluonne havaitaan esimerkiksi diffraktio- ja interferenssi-ilmiöissä, joita käsiteltiin Aallot-kurssissa. Sen sijaan ilmiöitä, joissa

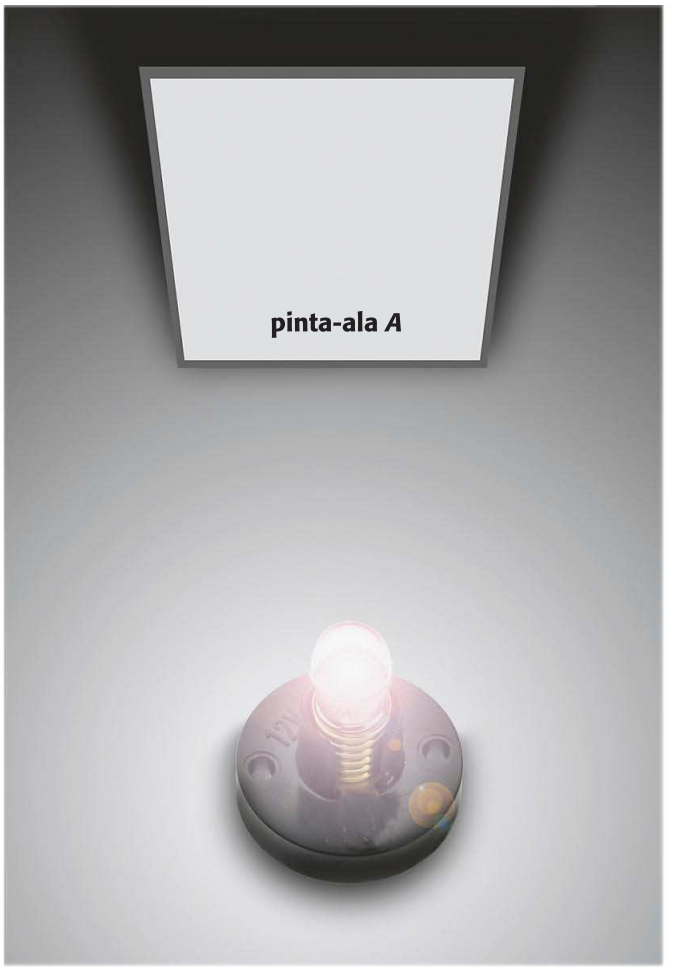
kuuma kaasu lähettää ja vastaanottaa säteilyä, ei pystytty täydellisesti selittämään klassisen fysiikan malleilla, jotka perustuivat valon aaltoluonteeseen.

1900-luvun alussa fyysikoilla oli useita ongelmia ratkaistavanaan, joista alla olevia kysymyksiä käsitellään tällä kurssilla.

Kysymyksiä, joihin klassinen fysiikka ei vastannut

- Millaista säteilyä kuuma kaasu lähettää?
- Miten kuuma, kiinteä kappale säteilee?
- Miten selitetään se, että valo irrottaa metallin pinnasta elektroneja?
- Miten röntgensäteily syntyy?

Tässä luvussa tarkastellaan kolmea ensimmäistä ongelmaa. Röntgensäteilyyn perehdytään seuraavassa luvussa.



▲ **Mitä suurempi energiamäärä kulkee säteilyn mukana aikayksikössä pinta-alan *A* läpi, sitä suurempi intensiteetti on.**

Valon emissio ja absorptio

1800-luvulla tutkittiin kiivaasti sähkön kulkua kaasupurkausputkessa, jossa kaasu oli erittäin pienessä paineessa. Tutkimuksissa havaittiin, että putken säteilemän valon väri riippuu siitä, mitä ainetta putken sisällä oli. Kun valo ohjattiin kulkemaan prisman tai hilan läpi, varjostimelle syntyi erillisistä värillisistä viivoista koostuva **viivaspektri**. Viivojen voimakkuutta kuvaava suure on **intensiteetti**.

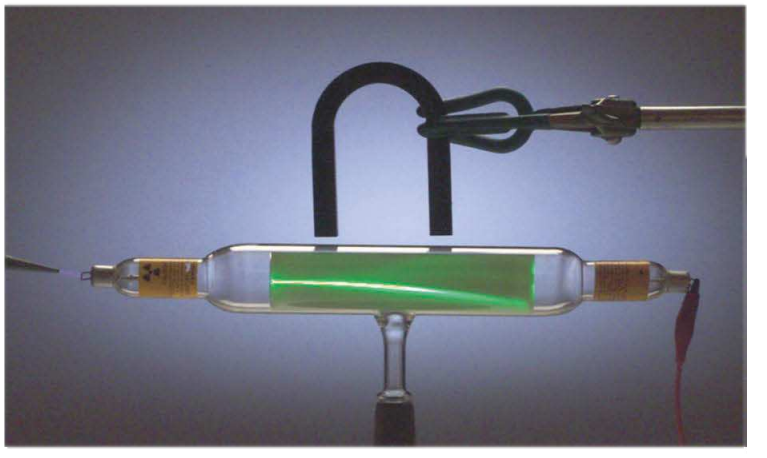
Intensiteetti

Intensiteetti kuvaa sitä, kuinka paljon energiaa säteily kuljettaa tietyn suuruisen pinnan läpi aikayksikössä.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\Delta E}{A\Delta t}$$

Intensiteetin yksikkö on

$$[I] = 1\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2 s}} = 1\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}.$$



▲ **Kaasupurkausputki eli katodisädeputki on pienipaineisella kaasulla täytetty lasiputki, jonka toisessa päässä on negatiivinen katodi ja toisessa päässä positiivinen anodi. Esimerkiksi ksenonkaasulla täytetty putki lähettää sinistä valoa ja natriumkaasulla täytetty keltaista valoa.**

Spektri

Spektri esittää säteilyn intensiteetin aallonpituuden tai taajuuden funktiona.

Emissiospektri

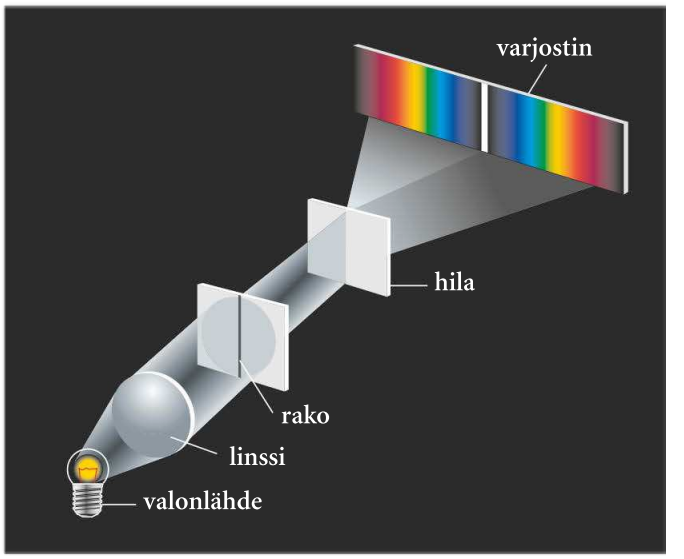
Aineen **lähettämän** eli emittoiman sähkömagneettisen säteilyn spektri on **emissiospektri** (engl. *to emit* = lähettää). Valo voidaan hajottaa spektriksi esimerkiksi hilan avulla. Eri aallonpituuksia vastaavat värit saadaan näkyviin, kun valo diffraktoituu eli taipuu hilassa. Taipumiskulma riippuu aallonpituudesta.

Tutki & kokeile

Tutki hehkuvan kaasun lähettämän säteilyn spektriä.

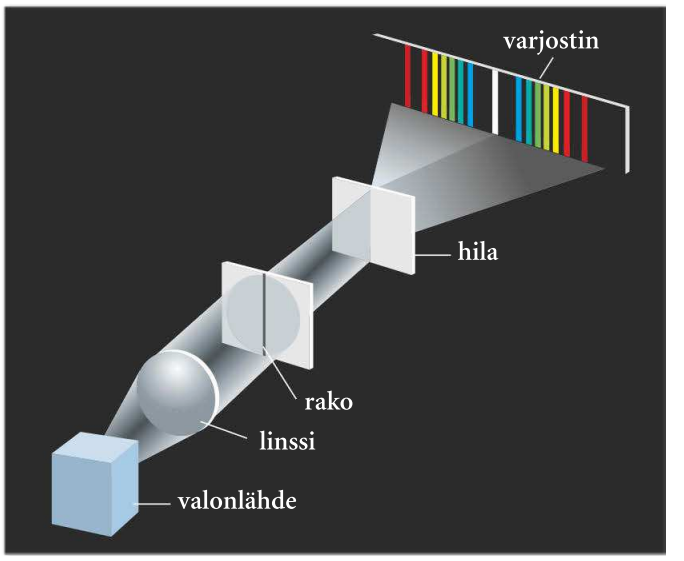
- Katso spektroskoopin läpi joko hehkulampun tai Auringon lähettämää valoa. Kuvaile näkemääsi ilmiötä.
- Katso seuraavaksi loisteputken lähettämää valoa. Miten näkemäsi poikkeaa edellisestä?
- Jos käytettävissä on kaasupurkausputkia (esim. He, Ne tai Hg), pimennä luokka ja tutki eri kaasujen lähettämiä spektrejä. Mitä havaitset?

Jatkuva spektri



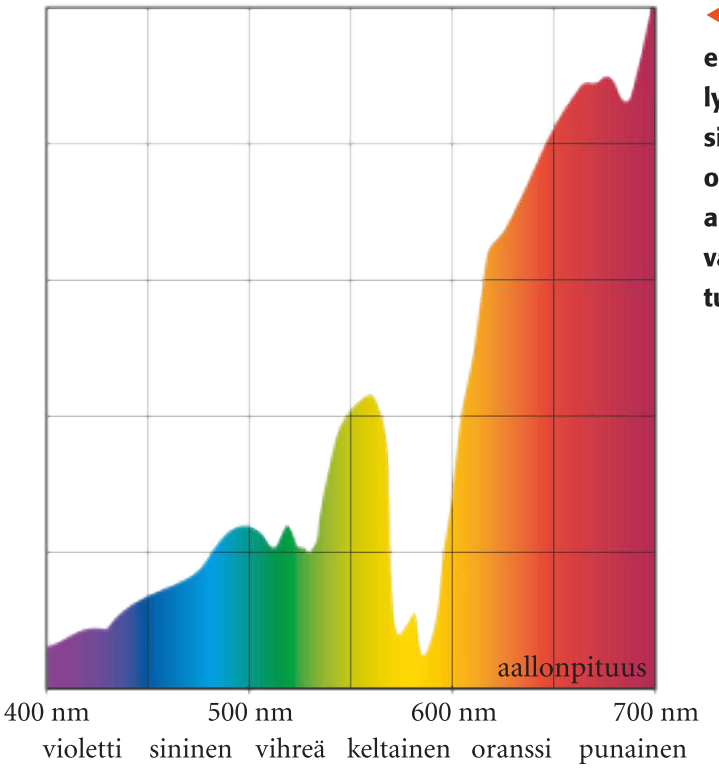
Kun hehkulampusta tuleva valo ohjataan raon läpi hilaan, varjostimelle syntyy keskellä olevan valkoisen valon viivan molemmille puolille jatkuva spektri. Punaista valoa vastaava aallonpituus taipuu eniten.

Viivaspektri



Myös kaasumaisesta lähteestä tuleva valo diffraktoituu hilassa, mutta varjostimella nähdään nyt erillisistä värillisistä viivoista koostuva viivaspektri.

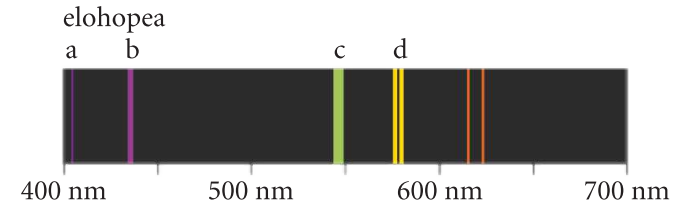
Hehkulampun emissiospektri



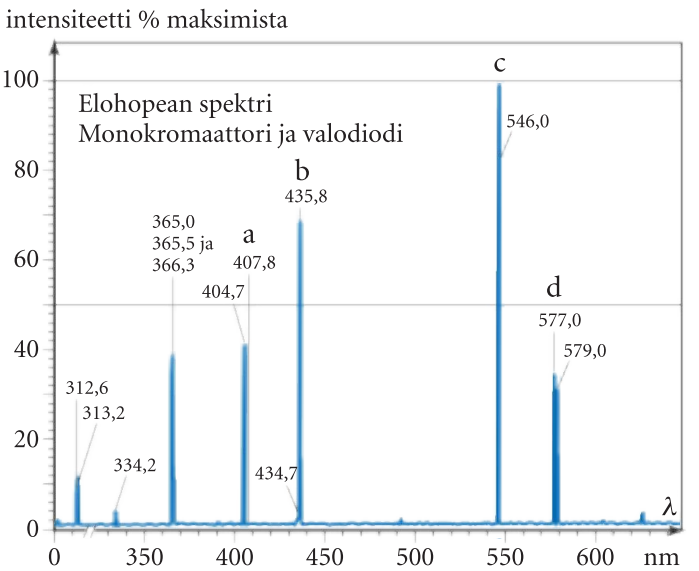
Hehkulampun emittoiman säteilyn spektrin intensiteettimaksimi on näkyvän valon alueella punaisen valon aallonpituuksilla.

Kuuma hehkuva ja kiinteä kappale, kuten lampun hehkulanka, **emittoi** eli lähettää valoa, jonka spektri on **jatkuva**. Spektrin jatkuvuus tarkoittaa, että sen värit muuttuvat rajatta violetista punaiseen. Myös nesteiden lähettämän valon spektri on jatkuva. Spektrin jatkuvuus aiheutuu kiinteässä ja nestemäisessä aineessa rakenneosien välisistä vuorovaikutuksista ja niihin liittyvistä virityksistä.

Hehkuvan, pienipaineisen, atomisen kaasun, esimerkiksi elohopeakaasun, emittoiman säteilyn spektri sisältää ainoastaan tiettyjä värejä vastaavat aallonpituudet, jotka muodostavat erillisistä viivoista koostuvan **viivaspektrin**.



▶ **Elohopeahöyryn emittoiman säteilyn spektri on viivaspektri. Tämä spektri näkyy myös loisteputken valoa tarkasteltaessa. Jokaisella kaasulla on erilainen kullekin kaasulle ominainen emissiospektri.**



▶ **Valoherkällä ilmaisimella saadaan näkyviin spektrin hienorakenne.**

Absorptiospektri

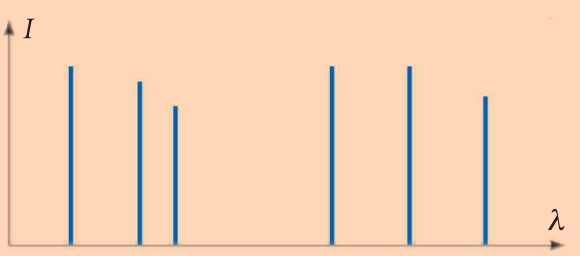
Aineet eivät ainoastaan lähetä säteilyä, vaan ne voivat myös imeä eli **absorboida** sitä. Kun kiinteän aineen emittoima valo, joka sisältää kaikki näkyvän valon aallonpituudet, kulkee kaasun läpi, havaitaan, että valon spektristä puuttuu osa aallonpituuksista. Ne näkyvät jatkuvaan spektriin syntyneinä mustina viivoina. Kaasu on **absorboinut** spektristä näitä aallonpituuksia vastaavan säteilyn energiat. Tämä spektri on kaasun **absorptiospektri**. Kaasun kaikki absorptiospektrin viivat näkyvät myös kyseisen kaasun emissiospektrissä. Kaikki emissiospektrin viivat eivät kuitenkaan näy absorptiospektrissä. Tämä ilmiö selitetään luvussa 3.

▲ **Osa emissiospektrin ja absorptiospektrin viivoista on samalla kohtaa.**

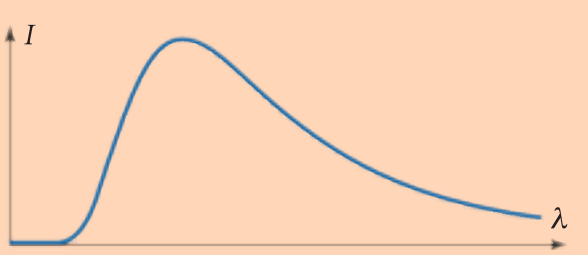
Kaasun lähettämän valon spektriä voidaan käyttää sen sisältämien alkuaineiden tunnistamiseen. Spektri on alkuaineen sormenjälki. **Spektroskopian** avulla tutkitaan sekä planeettojen kaasukehien koostumusta että esimerkiksi ilmansaasteita. Alkuaine helium löydettiin ensin Auringon spektristä ja vasta sitten maapallolta.

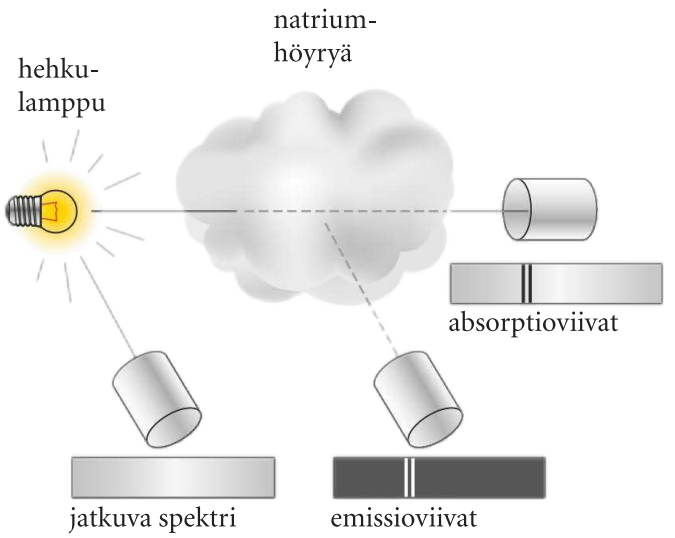
Viivaspektri ja jatkuva spektri

Harva, atominen kaasu emittoi säteilyä vain tietyillä erillisillä aallonpituuksilla, eli kaasun emissiospektri on viivaspektri.



Kiinteät kappaleet ja nesteet emittoivat jatkuvan spektrin, jossa on tietyllä aallonpituusalueella kaikki aallonpituudet.





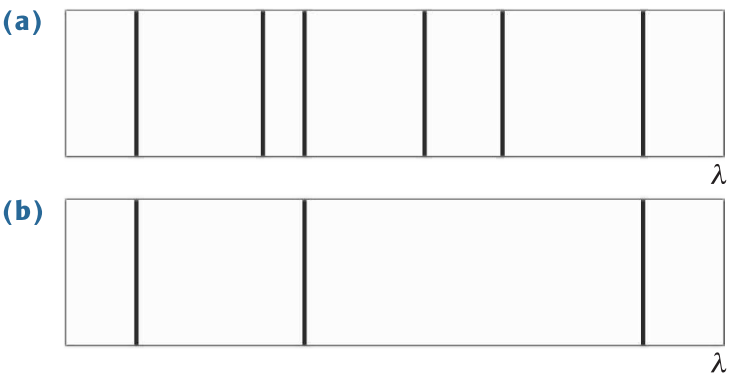
▲ **Hehkulampusta tulevan valon spektri on jatkuva. Natriumhöyryn läpi kulkeneen valon spektristä puuttuvat tietyt aallonpituudet. Tämä näkyy mustina viivoina absorptiospektrissä. Kun natriumhöyryä katsotaan sivulta, nähdään sen lähettämä emissiospektri, jossa on kirkkaina samat viivat, jotka näkyvät absorptiospektrissä mustina.**

Esimerkki 1

Oheisessa kuvassa on kaksi saman aineen spektriä.

a) Mistä voit päätellä, että spektrit ovat saman aineen spektrejä?

b) Kumpi spektreistä on emissio- ja kumpi absorptiospektri?



Ratkaisu

a) Osa spektrien spektriviivoista on samoilla aallonpituuksilla, joten on todennäköistä, että kyseessä ovat saman aineen spektrit.

b) Kaikki kaasun absorptiospektrin viivat näkyvät myös kyseisen kaasun emissiospektrissä, mutta kaikki emissiospektrin viivat eivät näy absorptiospektrissä. Tästä voidaan päätellä, että (b) on absorptiospektri ja (a) emissiospektri.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4

1.2 Säteilijän energia on kvantittunut

Kaikki kappaleet lähettävät sähkömagneettista säteilyä, kuten lämpösäteilyä ja valoa. Huoneen lämpötilassa olevien kappaleiden lähettämää säteilyä ei juuri huomaa, sillä sen intensiteetti on niin pieni. Lämpöpatterin lähettämän lämpösäteilyn voi jo tuntea, kun vie käden patterin lähelle. Punaisena hehkuvan keittolevyn lämpötila on noin 750 K ja lämpösäteilyn tuntee selvästi. Lämpösäteilyn lisäksi nähdään nyt myös valoa. Hehkulampun vastuslanka hehkuu kellertävänvalkoisena, kun sen lämpötila on noin 2 000 K.

▲ **Lämpökamera mittaa kuvauskohteen pinnasta lähtevää lämpösäteilyä. Kuvassa näkyvät punaisina vanhan talon lämpövuotokohdat.**

Musta kappale on säteilijää kuvaava malli

Täydellinen **musta kappale** on malli, joka kuvaa sellaisen kappaleen ominaisuuksia, joka absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Tällainen kappale ei siis heijasta lainkaan siihen osuvaa säteilyä. Täydellistä mustaa kappaletta ei kuitenkaan ole olemassa.

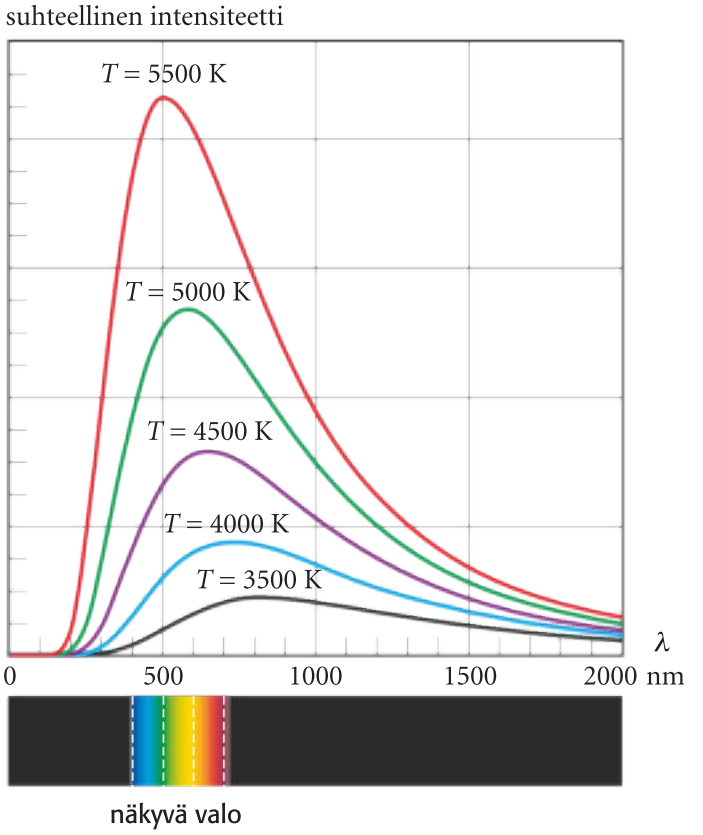
Kun musta kappale on lämpötasapainossa ympäristönsä kanssa, se emittoi saman määrän säteilyenergiaa kuin absorboi. Musta kappale siis myös säteilee kaikilla aallonpituuksilla.

Nimestään huolimatta musta kappale ei ole välttämättä edes kylmänä väriltään musta, ja se voi kuumana säteillä hyvinkin kirkkaana.

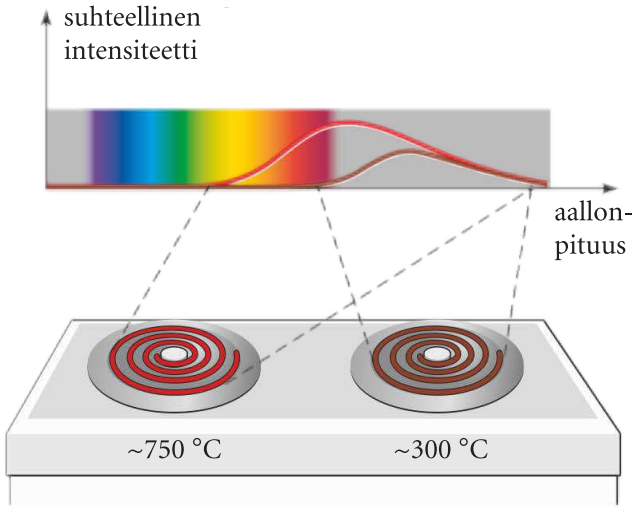
Musta kappale

Musta kappale on säteilijää kuvaava malli. Se absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Mustan kappaleen säteilyn spektri riippuu kappaleen lämpötilasta.

Mustan kappaleen lähettämää säteilyä sanotaan **mustan kappaleen säteilyksi**. Mustan kappaleen säteilyä voidaan käyttää monen todellisen säteilyn mallina. Mustan kappaleen lähettämä spektri on jatkuva.



▲ **Mustan kappaleen emissiospektrin intensiteettimaksimi on sitä pienemmällä aallonpituudella, mitä kuumempi kappale on.**



▲ **Keittolevyn lähettämän säteilyn spektri noudattelee mustan kappaleen spektrin muotoa. Kuuman keittolevyn lämpötila on 750 °C, ja sen lähettämän säteilyn intensiteettimaksimi osuu näkyvän valon aallonpituusalueen yläpuolelle. Siksi havaitsemme levyn hehkuvan vain heikosti punaisena. Kun levyn lämpötila on 300 °C, valoa ei havaita juuri ollenkaan.**

Auringon pintalämpötila on noin 5 800 K, ja sen lähettämän säteilyn intensiteettimaksimi osuu vihreän valon alueelle.

Saksalainen Wilhelm Wien johti vuonna 1894 kokeellisten havaintojen pohjalta mustan kappaleen lähettämälle säteilylle lain, joka kuvaa säteilyn intensiteettimaksimin lämpötilariippuvuutta. Lakia kutsutaan Wienin siirtymälaiksi.

Wienin siirtymälaki

$T\lambda_{\text{max}} = b,$

jossa

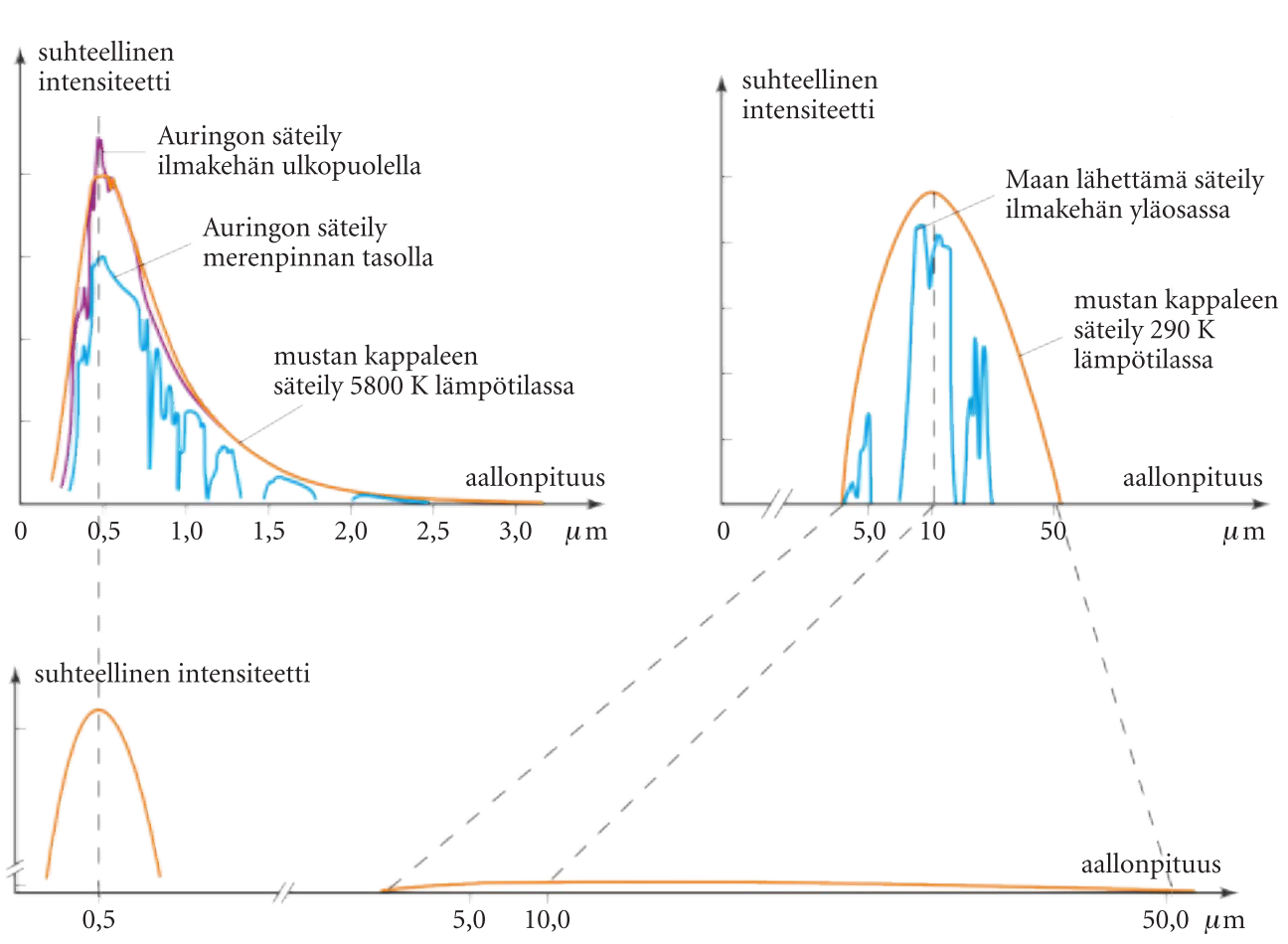
T on kappaleen lämpötila,

λ_{max} on säteilyn intensiteettimaksimia vastaava aallonpituus ja

b on vakio, jonka arvo on $2{,}897756 \cdot 10^{-3}$ m · K.

Wienin siirtymälain mukaan säteilyn intensiteettimaksimi osuu sitä pienemmille aallonpituuksille, mitä kuumempi kappale on.

Esimerkiksi tähden pintalämpötila voidaan määrittää vertaamalla sen lähettämän säteilyn spektriä mustan kappaleen säteilyn spektriin.



◀ **Ilmakehä absorboi sekä Maahan tulevasta Auringon säteilystä että maanpinnan avaruuteen lähettämästä säteilystä tietyt aallonpituudet. Sekä Auringon että Maan lähettämän säteilyn spektri osuu kuitenkin kohtuullisen hyvin yhteen mustan kappaleen säteilyn spektrin kanssa.**

▲ **Kuvassa on esitetty Auringon ja Maan lähettämän säteilyn intensiteetit aallonpituuden funktiona. Auringon säteilyn intensiteettimaksimi on aallonpituudella 500 nm ja Maan aallonpituudella 10 000 nm. Maan lähettämä säteily on luonnollisen, mutta myös voimistuvan kasvihuoneilmiön lähde.**

Esimerkki 1

Auringon lähettämän sähkömagneettisen säteilyn intensiteettimaksimi on aallonpituudella 500 nm. Mikä Auringon pintalämpötila on?

Ratkaisu

Auringon säteily noudattaa mustan kappaleen lähettämää säteilyä, joten sen pintalämpötila voidaan laskea Wienin siirtymälain $T\lambda_{\text{max}} = b$ avulla.

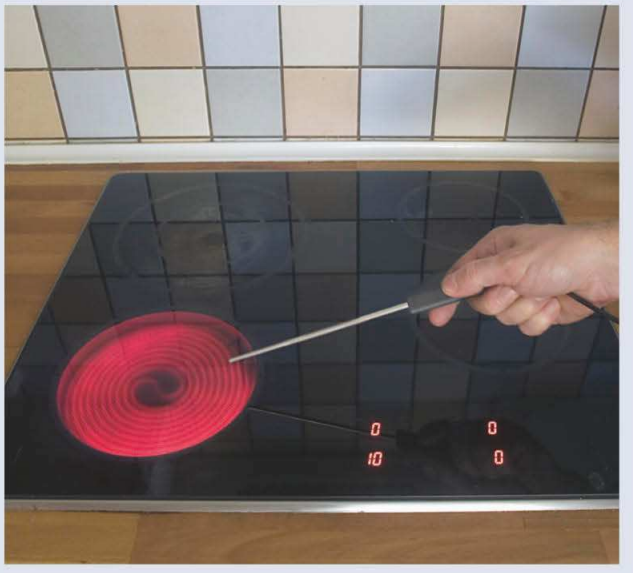
$$T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}$$
$$= \frac{2{,}897756 \cdot 10^{-3}\,\text{m} \cdot \text{K}}{500 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}$$
$$= 5795{,}512\ \text{K} \approx 5\,800\ \text{K}.$$

Vastaus

Auringon pintalämpötila on 5 800 K.

Tutki & kokeile

Tutki lieden kuuman levyn värin ja lämpötilan riippuvuutta.



- Mittaa kuuman levyn lämpötila termoelementillä.
- Laske Wienin siirtymälain mukaan säteilyn intensiteettimaksimia vastaava aallonpituus. Miten tulokset vastaavat levyn todellista väriä?

Einsteinin valon kvanttiteoria

Max Planck johti vuonna 1900 ilmestyneessä artikkelissaan teoreettisesti mustan kappaleen säteilyn spektrin oikean matemaattisen esityksen. Sähkömagnetismin teorian mukaan sähkömagneettinen säteily syntyy varattujen hiukkasten värähdellessä. Planck joutui johdossaan tekemään oletuksen, että värähtelijän energialla voi olla vain tiettyjä arvoja.

Värähtelijän energian mahdolliset arvot riippuvat värähtelijän taajuudesta f ja ne ovat tulon hf monikertoja,

$E = hf, 2hf, 3hf, \ldots,$

jossa vakio h on **Planckin vakio.** Planckin vakion arvo on SI-yksiköissä $6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ Js. Jos energian yksikkönä käytetään elektronivolttia, vakion arvo on $4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eVs . Koska värähtelijän energialla voi olla vain tiettyjä arvoja, se voi lähettää ja vastaanottaa energiaa vain tietynsuuruisina kvantteina.

Planckin kvanttihypoteesi

Värähtelijä voi vastaanottaa ja luovuttaa energiaa vain energiakvantteina

$E = hf,$

jossa

f on säteilyn taajuus ja
h on Planckin vakio.

Albert Einstein laajensi Planckin ajatusta ja esitti, että säteilyn energian kvantittuminen ei rajoitu vuorovaikutukseen aineen kanssa. Einsteinin mukaan säteily koostuu erillisistä, toisistaan riippumattomista ja hajoamattomista hiukkasmaisista osista, joiden energia on suoraan verrannollinen säteilyn taajuuteen. Näitä ”säteilyhiukkasia” sanotaan **fotoneiksi**. Fotoni syntyy sähkömagneettisen säteilyn emissiossa ja häviää absorptiossa.

Sähkömagneettisen säteilyn hiukkasmalli

Sähkömagneettista säteilyä voidaan kuvata hiukkasmallilla, jonka mukaan säteily koostuu energiakvanteista, fotoneista.

Fotoneilla on energia

$$E = hf$$

ja liikemäärä

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

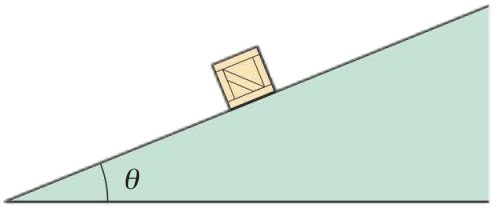
jossa

f on fotonin taajuus ja

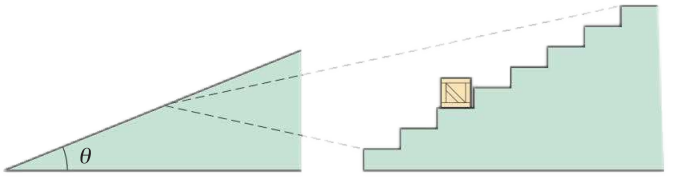
λ on säteilyn aallonpituus ja

h on Planckin vakio.

Fotonin koko energia on liike-energiaa, eikä sillä ole massaa. Fotonien ainoa mahdollinen nopeus tyhjiössä on valonnopeus.



▲ **Kaltevalla tasolla laatikon potentiaalienergia maahan nähden saa kaikki arvot väliltä 0 ja *mgh*.**



▲ **Energian kvantittumisesta johtuvat "energia-askeleet" ovat niin pieniä, että niitä ei voida havaita makromaailmassa. Rappusissa olevan laatikon potentiaalienergian arvot ovat kvantittuneet, mutta kun hyvin pitkien rappusten kuva pienennetään, portaat häviävät näkyvistä.**

Esimerkki 2

Ihmissilmä aistii herkimmin oranssin väristä valoa ($\lambda = 555$ nm). Pienin energiamäärä, jonka aivot käsittävät valona on 10^{-17} J. Mikä on pienin tämän värisen valon fotonimäärä, joka pystyy synnyttämään näköhavainnon?

Ratkaisu

Aaltoliikkeen perusyhtälön $v = \lambda f$ mukaan

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Fotonin energia on

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{555 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}$$

$$= 3{,}579 \cdot 10^{-19}\,\text{J}.$$

Energiamäärä, jonka suuruus on 10^{-17} J, sisältää

$$n = \frac{10^{-17}\,\text{J}}{3{,}579 \cdot 10^{-19}\,\text{J}}$$

$$= 27{,}939 \approx 28$$

fotonia.

Vastaus

28 fotonia riittää saamaan näköaistimuksen.

Esimerkki 3

Sähkömagneettisen säteilyn fotonin energia on 1,1 eV. Laske säteilyn
a) taajuus ja
b) aallonpituus tyhjiössä.

Ratkaisu

a) Fotonin energia on $E = hf$. Ratkaistaan tästä ensin säteilyn taajuus

$$f = \frac{E}{h}$$

$$= \frac{1{,}1 \text{ eV}}{4{,}136 \cdot 10^{-15} \text{eVs}} = 2{,}6596 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\approx 2{,}7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$$

b) Säteily etenee tyhjiössä valonnopeudella, joten aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan $c = \lambda f$. Ratkaistaan tästä aallonpituus

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$= \frac{2{,}9979 \cdot 10^{8} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2{,}6596 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}}$$

$$= 1{,}1272 \cdot 10^{-6} \text{ m} \approx 1{,}1 \text{ µm}.$$

Vastaus

a) Taajuus on $2{,}7 \cdot 10^{14}$ Hz.
b) Aallonpituus on 1,1 µm.

Tehtäviä ➢ 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13

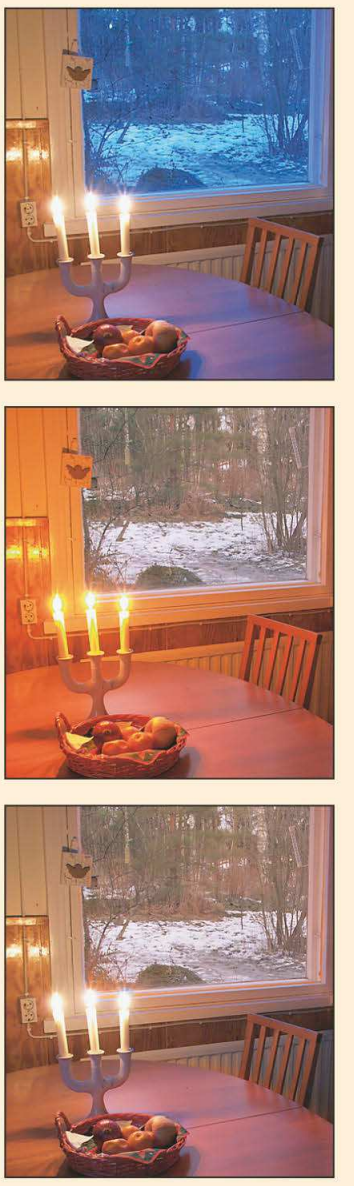
VÄRILÄMPÖTILA — EXTRA

Auringon lähettämää valoa voidaan pitää valkoisena valona. Esimerkiksi hehkulampun lähettämä valo on keltaista, koska sen lämpötila on matalampi kuin Auringon pinnan lämpötila. Yleisesti voidaan sanoa, että kappaleet lähettävät tietynväristä valoa, ja valon väri riippuu kappaleen lämpötilasta.

Tarkasteltavan kohteen valon spektriä verrataan mustan kappaleen spektriin, jonka lämpötila tiedetään. Kun spektrit vastaavat toisiaan, kohteen värilämpötila on sama kuin mustan kappaleen lämpötila. Tämä menetelmä onnistuu, jos tarkasteltavana on kohde, jonka lähettämä spektri on jatkuva. Jatkuva spektri on esimerkiksi hehkulampulla ja tähdellä.

Valokuvauksessa pyritään mahdollisimman totuudenmukaiseen värientoistoon, joten kuvattavan kohteen eri osien värilämpötilat on otettava huomioon. Digitaalikameroissa värilämpötilat huomioiva valkotasapaino voidaan yleensä määrittää valitsemalla yksi esiasetuksista, joita voivat olla esimerkiksi suora auringonvalo ja keinovalo.

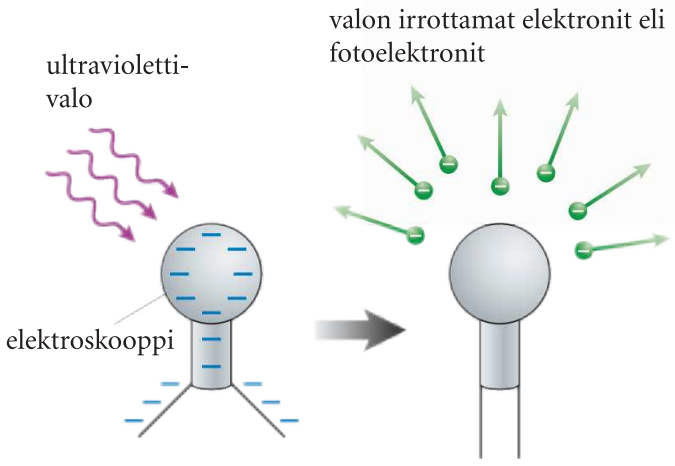
▲ **Kun värilämpötila nousee 2 000 K:istä 12 000 K:iin, valon väri muuttuu punaisesta siniseksi. Tavallisen hehkulampun värilämpötila on 2 700 K ja halogeenilampun noin 3 000 K. Halogeenilamppujen valoa pidetään lämpimänä ja miellyttävänä. Julkisissa tiloissa käytetään loisteputkia, joiden värilämpötila on 4 000 K.**



◀ **Auringonvalon värilämpötila muuttuu päivän aikana. Digitaalikameroissa on usein automaattinen valkotasapainon säätö, joka toimii luotettavasti 4 200–8 000 K:n värilämpötiloilla. Kuvissa värilämpötilat ovat sisällä 3 000 K ja ulkona 6 000 K.**

1.3 Valosähköilmiö

Heinrich Hertz osoitti, että sähkömagneettista säteilyä voidaan saada aikaan keinotekoisesti. Hertzin kokeet tukivat Maxwellin sähkömagneettista teoriaa. Samalla nämä kokeet viimeistelivät klassisen fysiikan maailmankuvan. Onkin tavallaan ironista, että kokeissaan Hertz löysi myös ilmiön, joka koitui klassisen fysiikan kohtaloksi. Hertz huomasi, että ultraviolettivalo irrotti varauksia metallin pinnasta.



▲ **Hertz havaitsi, että ultraviolettivalo purkaa negatiivisesti varatun elektroskoopin varauksen.**

Valosähköilmiö

Ilmiötä, jossa kappaleen pintaan osuva sähkömagneettinen säteily irrottaa siitä elektroneja, sanotaan valosähköilmiöksi. Irronneita elektroneja kutsutaan fotoelektroneiksi.

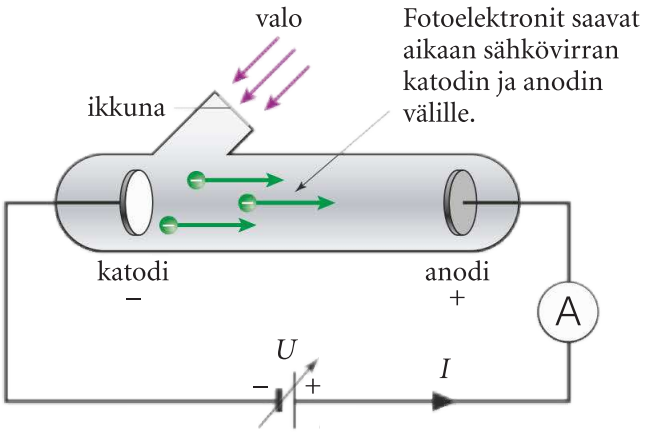
▲ **Ruohonleikkurin aurinkokennoissa tapahtuu valosähköilmiö.**

Tutki & kokeile

Tutki valosähköistä ilmiötä. **Ultraviolettilamppua saa käyttää ainoastaan opettaja.**

- Kytke sinkkilevy elektroskooppiin. Varaa elektroskooppi eboniittisauvalla.
- Valaise sinkkilevyä ultraviolettivalolla. Mitä havaitset? Mitä havaitsemasi ilmiö tarkoittaa?
- Aseta lasilevy lampun ja levyn väliin. Purkautuuko varaus nyt?
- Toista koe vielä varaamalla levy nyt lasisauvalla. Mitä nyt havaitset?

Valosähköilmiötä voidaan tutkia laitteistolla, jossa kaksi elektrodia, katodi ja anodi on asetettu lasiputkeen, josta on poistettu ilma. Katodia valaistaan valolla, jonka aallonpituutta voidaan muuttaa. Kun katodia valaistaan, havaitaan, että tyhjiöputkessa on sähkövirta.

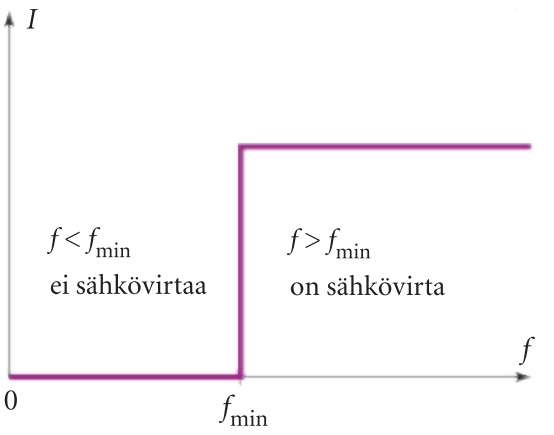


▲ **Valosähköilmiötä tutkitaan tyhjiöputkella, jossa jännitettä voidaan muuttaa ja jännitteen suuntaa vaihtaa. Kokeessa mitataan sähkövirtaa, kun jännitettä, valon taajuutta ja intensiteettiä muutetaan.**

Koska tyhjiöputken kaasu ja johtimet muodostavat suljetun virtapiirin, putken elektrodien välillä on oltava virtamittarin ilmaisema sähkövirta. Kun valo sammutetaan, sähkövirta loppuu välittömästi. Tästä voidaan päätellä, että valo irrottaa katodilta vakiomäärän elektroneja aikayksikössä. Valon irrottamia elektroneja kutsutaan fotoelektroneiksi. Nimi johtuu niiden syntytavasta, eivätkä fotoelektronit poikkea mitenkään muista elektroneista.

Valosähköilmiön kokeista voidaan koota seuraavat havainnot:

1. Fotoelektroneja irtoaa vain, kun valon taajuus on suurempi kuin **rajataajuus** f_{min}. Rajataajuus on siis pienin valon taajuus, jolla elektroneja irtoaa metallin pinnasta.



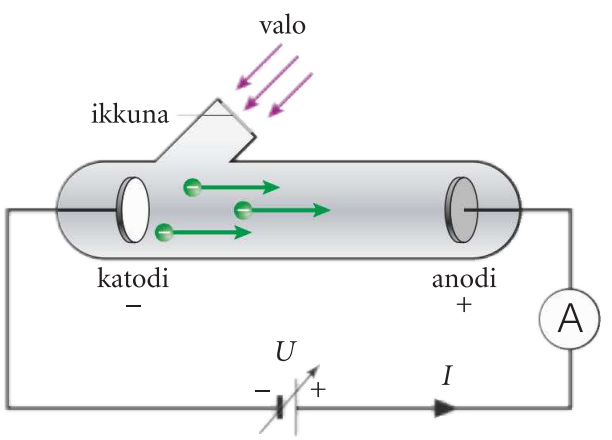
▲ **Sähkövirtaa ei ole, vaikka valon intensiteetti olisi miten suuri tahansa, jos valon taajuus on rajataajuutta pienempi, $f < f_{min}$, eli aallonpituus raja-aallonpituutta suurempi $\lambda > \lambda_{min}$.**

2. Sähkövirta on suoraan verrannollinen valon intensiteettiin. Kun intensiteetti kaksinkertaistuu, myös sähkövirta kaksinkertaistuu.

3. Sähkövirta syntyy heti, kun katodia valaistaan valolla, jonka taajuus on suurempi kuin rajataajuus, $f > f_{min}$.

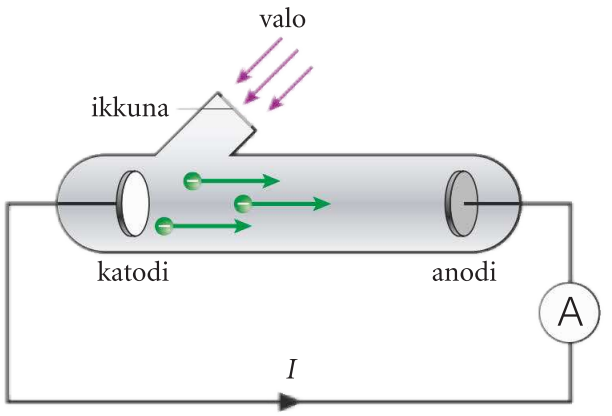
4. Rajataajuuden f_{min} arvo riippuu siitä, mitä metallia katodi on. Se on esimerkiksi kalsiumille pienempi kuin natriumille.

5. **a)** Jos jännite on positiivinen (anodi on korkeammassa potentiaalissa kuin katodi), sähkövirta ei muutu, vaikka jännitettä kasvatetaan. Varausta kuljettavat ultraviolettivalon metallin pinnasta irrottamat elektronit. Niiden määrä riippuu vain valon intensiteetistä.



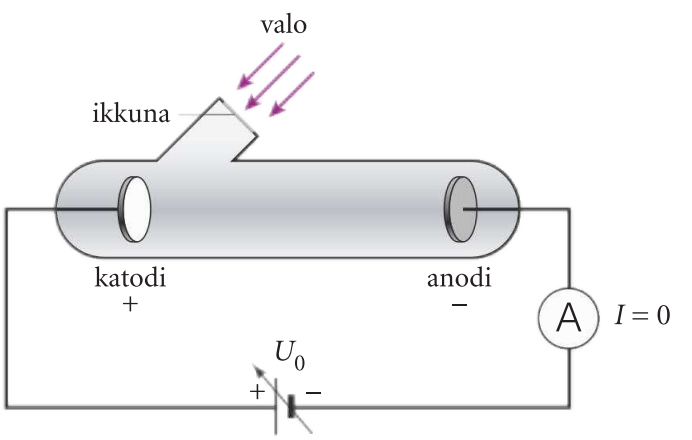
▲ **Valo irrottaa metallin pinnasta tietyn määrä elektroneja. Sähkövirta ei muutu, vaikka jännitettä kasvatetaan.**

b) Jos jännitelähde otetaan pois ja virtapiiri pidetään suljettuna, sähkövirta havaitaan edelleen.

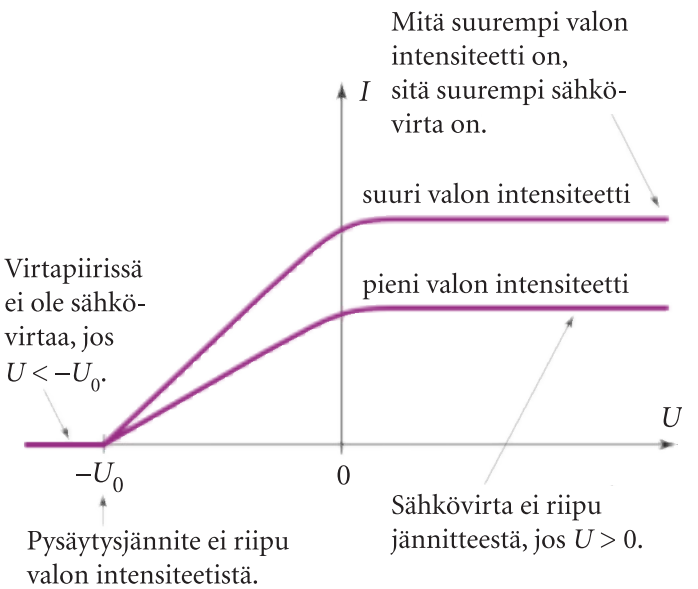


▲ **Virtapiirissä on sähkövirta, jonka saa aikaan valon irrottamat fotoelektronit.**

c) Jos jännitelähteen navat vaihdetaan vastakkaisiksi (anodi on nyt alemmassa potentiaalissa kuin katodi), sähkövirta pienenee, kun jännitettä kasvatetaan. Vastakkaissuuntainen jännite jarruttaa elektroneja. Tietyllä jännitteen arvolla $-U_0$ sähkövirta loppuu. Tätä jännitteen arvoa U_0 sanotaan **pysäytysjännitteeksi.**



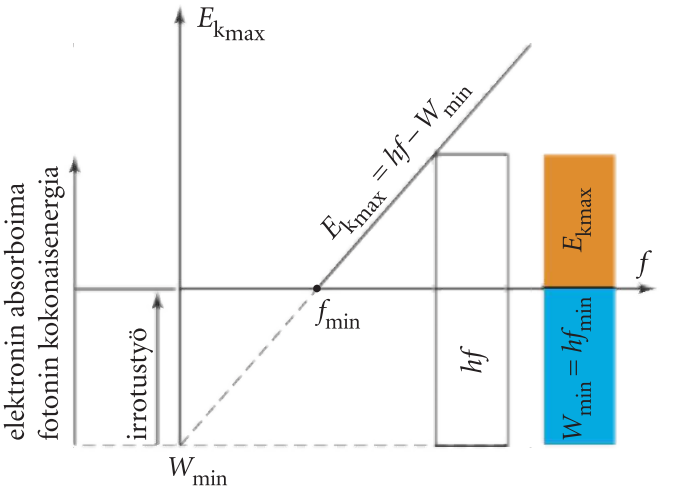
6. Pysäytysjännite on yhtä suuri pieni- ja suuri-intensiteettiselle valolle. Suurempi valon intensiteetti saa aikaan suuremman sähkövirran, koska elektroneja irtoaa enemmän.



Valosähköilmiö voidaan selittää valon kvanttiteorian avulla. Einsteinin mukaan valo koostuu fotoneista, joiden energia on hf. Valosähköilmiössä fotoni luovuttaa metallissa olevalle elektronille energiaa. Jos fotonin energia on pienempi kuin elektronin irrottamiseen tarvit-

tava pienin energia eli **irrotustyö** W_{min}, elektroneja ei irtoa, vaikka valon intensiteettiä kasvatetaan rajatta.

Jos fotonin energia on suurempi kuin irrotustyö W_{min}, niin jäljelle jäänyt energia ilmenee elektronin liike-energiana. Koska elektroneilla on erisuuria sidosenergioita, niiden irrottamiseen tarvitaan erisuuri työ W. Tästä syystä elektroneilla on erilaisia liike-energioita $E_{\text{k}} = hf - W$.



▲ **Palkin korkeus kertoo fotonin energian *hf*. Osa siitä menee elektronin irrottamiseen. Elektronin liike-energia on suurin, kun irrottamiseen kuluva energia on irrotustyön suuruinen. Kuvaajassa katkoviivalla jatkuva suora on mitatun aineiston jatke. Havainnot päättyvät rajataajuuteen.**

Valosähköilmiö

Valosähköilmiössä metalliin sitoutunut elektroni absorboi fotonin, jonka energia on hf ja irtoaa fotoelektronina, jonka liike-energia on

$$E_{\text{k}} = hf - W.$$

Rajataajuudella f_{min} fotonin energia riittää heikoimmin sidottujen elektronien irrottamiseen niin, että elektroneille ei jää liike-energiaa

$$E_{\text{k}} = hf_{\text{min}} - W_{\text{min}} = 0,$$

joten

$$W_{\text{min}} = hf_{\text{min}}.$$

Fotoelektronit saavat suurimman liike-energian E_{kmax}, kun niiden irrottamiseen tarvittava energia on pienin eli irrotustyön W_{min} suuruinen.

$$E_{\text{kmax}} = hf - W_{\text{min}}$$

eli

$$E_{\text{kmax}} = hf - hf_{\text{min}}.$$

Kokeellisesti määritetystä suoran $E_{\text{kmax}} = hf - W_{\text{min}}$ kuvaajasta saadaan määritettyä sekä Planckin vakio h, irrotustyö W_{min} että rajataajuus f_{min}.

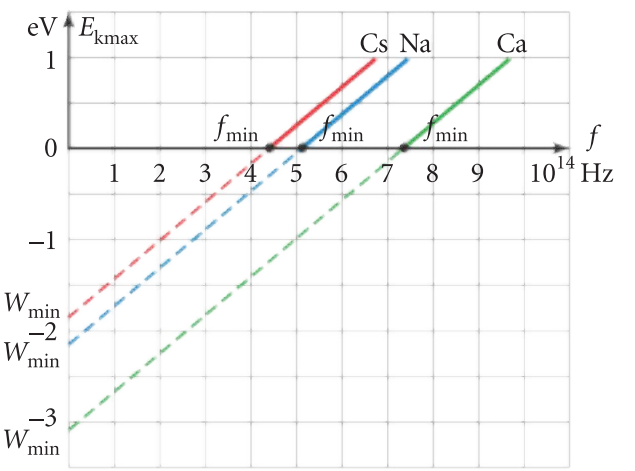
Suoran yleinen yhtälö on muotoa

$$y = kx + b.$$

Suoran

$$E_{\text{kmax}} = hf - W_{\text{min}}$$

yhtälössä h on suoran fysikaalinen kulmakerroin. Irrotustyö on suoran ja E_{kmax}-akselin leikkauspisteestä saatava energian arvo, ja rajataajuus on suoran ja f-akselin leikkauspisteen taajuuden arvo.



▶ **Rajataajuus f_{min} ja siten irrotustyö W_{min} ovat kullekin aineelle ominainen. Suora kuvaa fotoelektronien suurimman liike-energian riippuvuutta säteilyn taajuudesta. Suorien kulmakerroin on Planckin vakio, joten niiden jyrkkyys on sama, irrotustyöt ovat kullekin metallille ominaiset.**

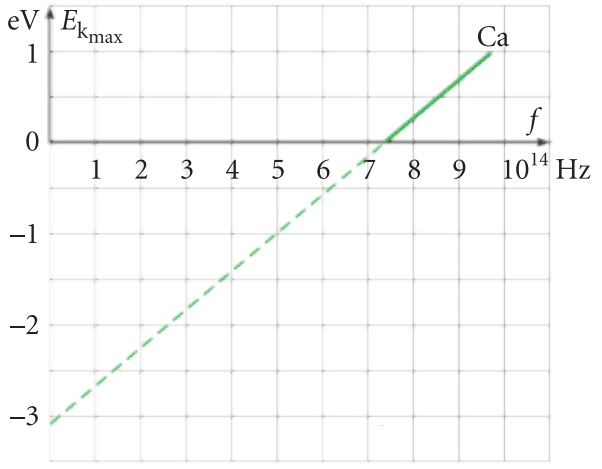
Esimerkki 1

Eräässä tutkimuksessa selvitettiin, miten elektroneja saadaan irtoamaan kalsiummetallin pinnasta. Määritä kuvan perusteella

a) kalsiumin irrotustyö

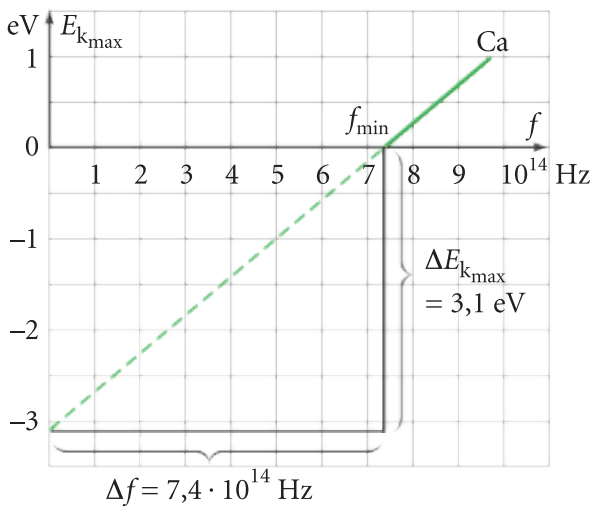
b) rajataajuus

c) Planckin vakio.



Ratkaisu

a) Kuvaajasta saadaan määritettyä irrotustyö W_{min}. Irrotustyö on suoran $E_{kmax} = hf - W_{min}$ ja E_{kmax}-akselin leikkauspisteen energian arvo.



Irrotustyön arvo on $W_{min} = 3{,}1$ eV.

b) Kalsiumin rajataajuus f_{min} on suoran $E_{kmax} = hf - W_{min}$ ja f-akselin leikkauspisteen arvo. Kuvasta saadaan $f_{min} = 7{,}4 \cdot 10^{14}$ Hz.

c) Planckin vakion arvo h on suoran $E_{kmax} = hf - W_{min}$ fysikaalinen kulmakerroin. Luetaan arvot kuvaajasta ja lasketaan kulmakertoimen arvo

$$h = \frac{\Delta E_{kmax}}{\Delta f}$$

$$= \frac{3{,}1 \text{ eV}}{7{,}4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}}$$

$$= 4{,}1892 \cdot 10^{-15} \text{eVs} \approx 4{,}2 \cdot 10^{-15} \text{eVs}.$$

Vastaus

a) Irrotustyö on 3,1 eV.

b) Rajataajuus on $7{,}4 \cdot 10^{14}$ Hz.

c) Planckin vakion arvo on $4{,}2 \cdot 10^{-15}$ eVs.

Esimerkki 2

Natriumin irrotustyö on 2,75 eV. Laske

a) valosähköilmiön rajataajuus natriumille on

b) fotoelektronien maksimiliike-energia, kun natriumia valaistaan valolla, jonka aallonpituus on 300 nm.

Ratkaisu

a) Koska irrotustyö on

$$W_{\text{min}} = hf_{\text{min}},$$

saadaan rajataajuudeksi

$$\begin{aligned} f_{\text{min}} &= \frac{W_{\text{min}}}{h} \\ &= \frac{2{,}75\ \text{eV}}{4{,}136 \cdot 10^{-15}\text{eVs}} \\ &= 6{,}6489 \cdot 10^{14}\,\frac{1}{\text{s}} \approx 6{,}65 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}. \end{aligned}$$

b) Fotonin energia on

$$\begin{aligned} E = hf &= \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\text{eVs} \cdot 2{,}9979 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{300 \cdot 10^{-9}\text{m}} \\ &= 4{,}133\ \text{eV}, \end{aligned}$$

joten saadaan

$$\begin{aligned} E_{\text{kmax}} &= hf - W_{\text{min}} \\ &= 4{,}133\ \text{eV} - 2{,}75\ \text{eV} \approx 1{,}39\ \text{eV} \end{aligned}$$

Tulos voidaan ilmaista myös jouleina

$$\begin{aligned} E_{\text{kmax}} &= 1{,}39\ \text{eV} = 1{,}39 \cdot 0{,}1602\ \text{aJ} \\ &= 0{,}22678\ \text{aJ} \approx 0{,}227\ \text{aJ}. \end{aligned}$$

Vastaus

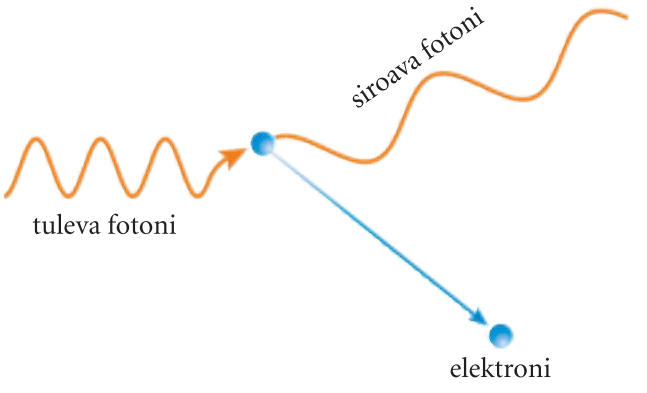
a) Rajataajuus natriumille on $6{,}65 \cdot 10^{14}$ Hz.

b) Maksimi liike-energia on 1,39 eV.

Comptonin sironta

Kun aineeseen osuva fotoni **siroaa** aineen atomiin **sidotusta** elektronista, säteilyn aallonpituus ei muutu. Tapahtumaa voidaan ajatella fotonin ja atomiin sidotun elektronin kimmoisana törmäyksenä. Fotoni vuorovaikuttaa **koko atomin kanssa**. Esimerkiksi hiiliatomin massa on 20 000-kertainen verrattuna elektronin massaan. Tätä ilmiötä, jossa tulevan ja lähtevän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on sama, kutsutaan Thomsonin sironnaksi.

Kun aineeseen osuvan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on riittävän pieni, havaitaan ilmiö, jossa aineeseen tulevan säteilyn aallonpituus on pienempi kuin siitä poistuvan säteilyn aallonpituus. Ilmiö on sitä voimakkaampi, mitä pienempi tulevan säteilyn aallonpituus on. Tätä ilmiötä, jossa aallonpituus muuttuu sironnassa, kutsutaan **Comptonin sironnaksi** löytäjänsä Arthur Comptonin mukaan.



▲ **Kokeellisesti on havaittu, että aineeseen tulevan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus voi olla pienempi kuin aineesta siroavan säteilyn aallonpituus.**

Compton selitti havaitsemansa ilmiön valon kvantittumisen avulla. Aineeseen tuleva **fotoni luovuttaa osan energiastaan vapaalle elektronille liike-energiaksi.** Tapahtumaa voidaan ajatella fotonin ja vapaan elektronin kimmoisana törmäyksenä.

Comptonin sironta

Comptonin sironnassa fotoni törmää kimmoisasti vapaaseen elektroniin. Osa fotonin energiasta muuttuu elektronin liike-energiaksi.

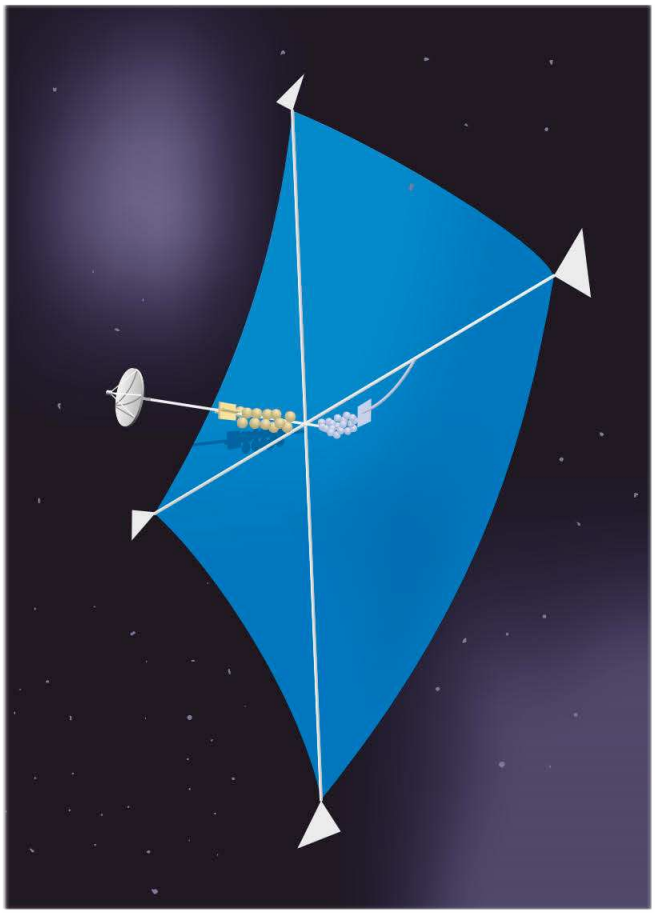
$$E_k = hf_0 - hf,$$

jossa

f_0 on tulevan säteilyn taajuus ja
f on sironneen säteilyn taajuus.

Comptonin havainto vahvisti ajatusta, että valo on kvantittunut. Valo koostuu fotoneista, joilla on tietty energia ja liikemäärä.

Fotonit aiheuttavat kappaleeseen törmätessään **säteilypaineen.** Säteilypaine aiheutuu siitä, että fotoneilla on liikemäärä, josta osa siirtyy törmäyksessä kappaleen liikemääräksi.



Avaruudessa liikutaan tulevaisuudessa aurinkopurjeen avulla. Auringosta tulevan sähkömagneettisen säteilyn fotonit osuvat aurinkopurjeeseen, joka on valmistettu heijastavasta aineesta. Osa fotoneiden liikemäärästä siirtyy törmäyksissä aurinkopurjeelle. Aurinkopurjeen kiihtyvyys on pieni, mutta ajan kuluessa nopeus kasvaa suuremmaksi kuin tavallista polttoainetta käyttävillä avaruusaluksilla. Alus voisi hakea vauhtia Auringon läheltä. Näin kiihdytettynä se voisi matkata esimerkiksi Plutoon vuodessa.

Esimerkki 3

Metallin pintaan osuu sähkömagneettista säteilyä, jonka taajuus on $6{,}4 \cdot 10^{21}$ Hz. Pinnasta sironneen säteilyn taajuuden havaittiin muuttuneen arvoon $1{,}9 \cdot 10^{21}$ Hz. Kuinka suuren liike-energian metallin vapaa elektroni saa säteilyltä?

Ratkaisu

Comptonin sironnassa aineeseen tuleva fotoni luovuttaa osan energiastaan elektronille liike-energiaksi

$$\begin{aligned} E_k &= hf_0 - hf \\ &= h(f_0 - f) \\ &= 6{,}6261 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}\ (6{,}4 \cdot 10^{21}\,\tfrac{1}{\text{s}} - 1{,}9 \cdot 10^{21}\,\tfrac{1}{\text{s}}) \\ &= 6{,}6261 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \cdot 4{,}5 \cdot 10^{21}\,\tfrac{1}{\text{s}} \\ &= 2{,}9817 \cdot 10^{-12}\,\text{J} \approx 2{,}98\ \text{pJ}. \end{aligned}$$

Vastaus

Elektronin saama liike-energia on 2,98 pJ.

Esimerkki 4

Silmään osuu monokromaattista säteilyä, jonka aallonpituus on 520 nm. Laske tämän säteilyn fotonin
a) energia
b) liikemäärä.

Ratkaisu

a) Planckin lain mukaan fotonien energia on

$$\begin{aligned} E &= hf = \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{520 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \\ &= 2{,}3845\ \text{eV} \approx 2{,}4\ \text{eV} \approx 3{,}8 \cdot 10^{-19}\,\text{J}. \end{aligned}$$

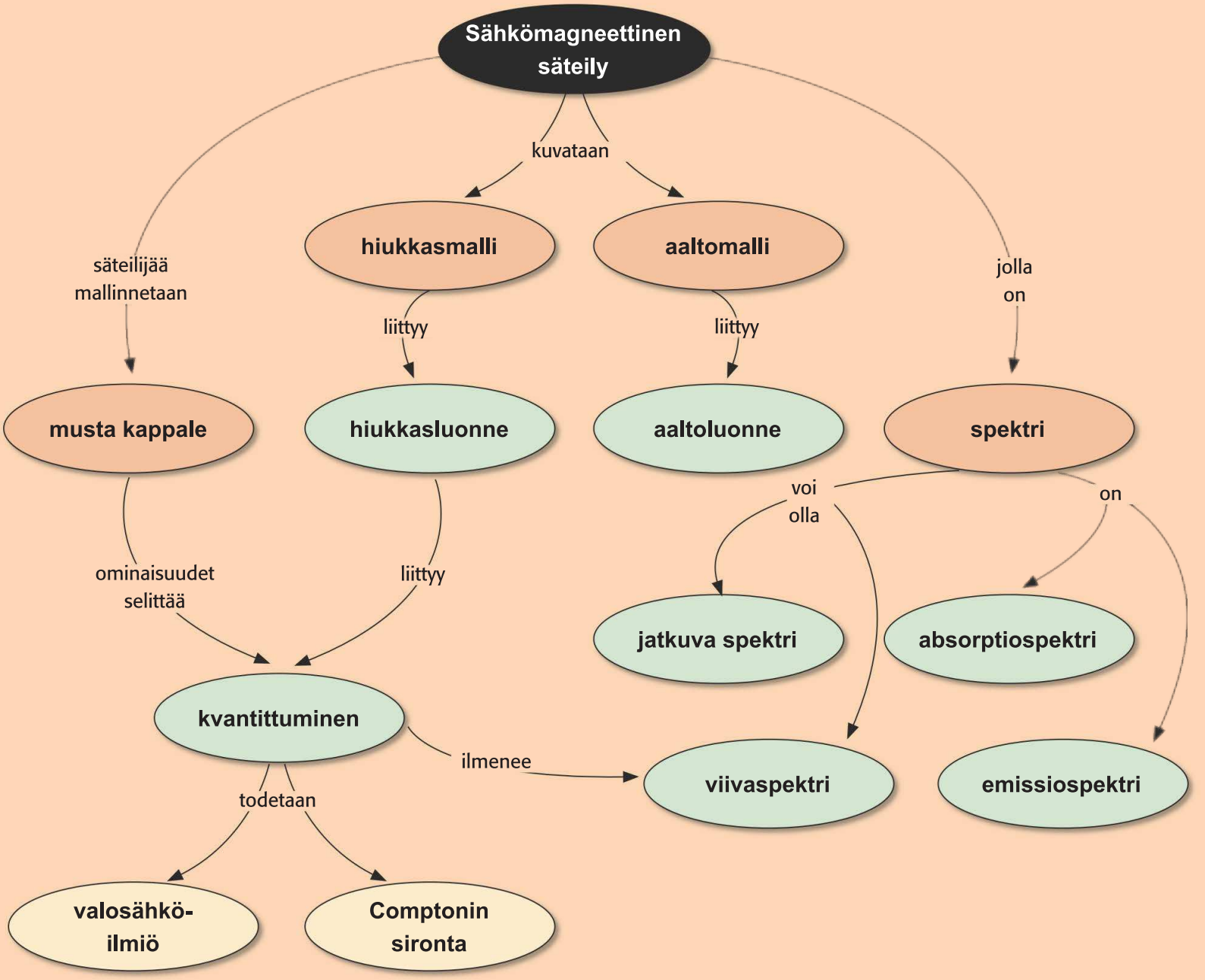
b) Fotonien liikemäärä on

$$\begin{aligned} p &= \frac{h}{\lambda} \\ &= \frac{6{,}6261 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{520 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \\ &= 1{,}2742 \cdot 10^{-27}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-27}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Vastaus

a) Fotonin energia on 2,4 eV.
b) Fotonin liikemäärä on $1{,}3 \cdot 10^{-27}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$.

YHTEENVETO



Tehtäviä ➢ 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- spektri
- musta kappale
- kvantittuminen
- valosähköilmiö

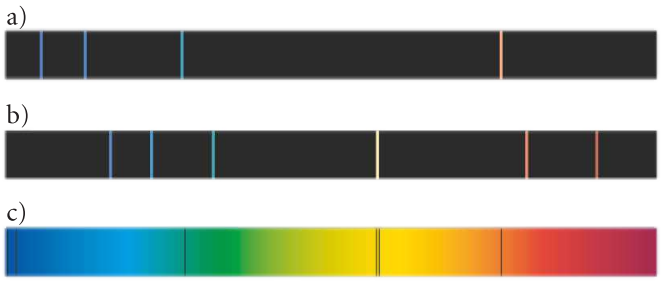
1.1

1. **a)** Mitä tarkoitetaan säteilyn yhteydessä spektrin käsitteellä?
b) Piirrä sopivaan koordinaatistoon periaatekuva 1) hehkulampun ja 2) kaasupurkausputken säteilyn spektristä.
c) Mitä tarkoitetaan absorptiospektrillä, ja miten se syntyy? (Yo kevät 1991, teht. 9)

2. Kertaa Physica 3 -kirjasta, miten prisman ja läpäisyhilan läpi kulkeneet spektrit eroavat toisistaan.

3. Esitä esimerkki tilanteesta, jossa valoa
a) emittoituu
b) absorboituu.

4. Kuvassa on vedyn (a) ja heliumin (b) emissiospektrit ja Auringon absorptiospektri (c). Miten voit päätellä spektrien perusteella, että Auringon kaasukehässä on sekä vetyä että heliumia?



1.2

5. **a)** Mikä on fotoni?
b) Miksi fotonin voidaan ajatella liikkuvan valonnopeudella, vaikka sen ajatellaan olevan hiukkanen?

6. Näkyvän valon keskimääräinen aallonpituus on 550 nm. Laske tätä aallonpituutta vastaavan fotonin
a) energia
b) liikemäärä.

7. Miten tähtien pintalämpötila voidaan määrittää?

8. **a)** Mitä käsite musta kappale tarkoittaa?
b) Mitä tarkoitetaan säteilyn lämpötilalla?

9. Hehkulampun hehkulangan lämpötila on noin 3 000 K. Mikä on hehkulampun säteilyn intensiteettimaksimin fotonin energia?

10. Millä aallonpituudella on säteilyn spektrin huipun kohta
a) 2,7 K:n taustasäteilyllä
b) 1 200 K:n kaasuliekillä?

11. Maan lähettämän sähkömagneettisen säteilyn intensiteettimaksimi on aallonpituudella 10 000 nm. Mikä on tämän tiedon perusteella Maan keskimääräinen pintalämpötila?

12. Näkyvän valon keskimääräinen aallonpituus on 550 nm. Laske tätä aallonpituutta vastaavan fotonin
a) energia
b) liikemäärä.

13. Laske säteilyn aallonpituus, kun sen fotonien energia on 1,15 eV.

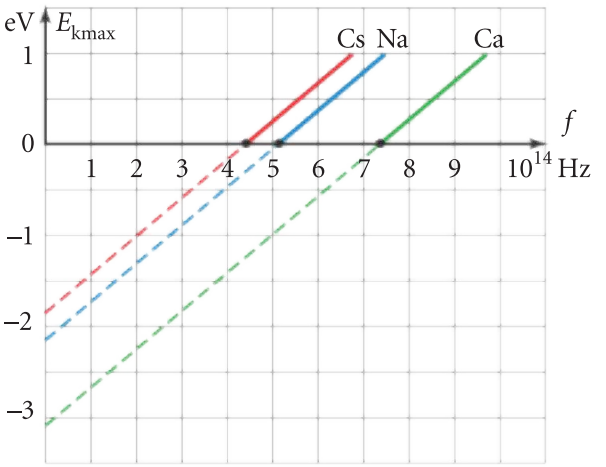
1.3

14. **a)** Mitä tarkoitetaan Comptonin sironnalla?
b) Miten Comptonin sirontaa koskevat havainnot ovat ristiriidassa klassisen fysiikan kanssa?
c) Miten Einsteinin valon kvanttiteoria liittyy Comptonin sirontaan?

15. **a)** Mitä tarkoittaa valosähköilmiö?
b) Mitä tarkoittaa elektronin sidosenergia metallissa?
c) Mitä tarkoittaa elektronin irrotustyö metallissa?

16. Mitkä ilmiöt tukevat käsitystä, että sähkömagneettisen säteily on kvantittunut?

17. Kuvaajassa on esitetty cesiumin, natriumin ja kalsiumin valosähköilmiön kuvaajat.
Päättele kuvaajan perusteella cesiumin ja natriumin
a) rajataajuus
b) irrotustyö.



18. Elektronien irrotustyö alumiinista on 4,2 eV. Laske alumiinista irronneiden nopeimpien fotoelektronien liike-energia, kun alumiiniin osuu monokromaattinen säteily, jonka aallonpituus on 190 nm.

19. Erään metallin pintaan osuu valo, jonka aallonpituus on 280 nm. Metallin pinnasta irronneiden fotoelektronien pysäytysjännitteeksi saatiin 0,90 eV.
a) Kuinka suuri on fotoelektronien maksimiliike-energia?
b) Kuinka suuri on metallin irrotustyö?
c) Miten pysäytysjännite muuttuisi, jos valon aallonpituus olisi 290 nm?

20. Aiheuttaako näkyvä valo valosähköilmiötä kaliumissa? Vihje: Katso näkyvän valon aallonpituudet taulukkokirjasta.

21. Tutkittaessa valosähköilmiötä määritettiin eri aallonpituuksia λ vastaavat pysäytysjännitteet U. Tutkimuksessa saatiin seuraavat tulokset.

λ (nm)	590	550	450	390	370	320
U (V)	0,11	0,28	0,90	1,2	1,4	2,0

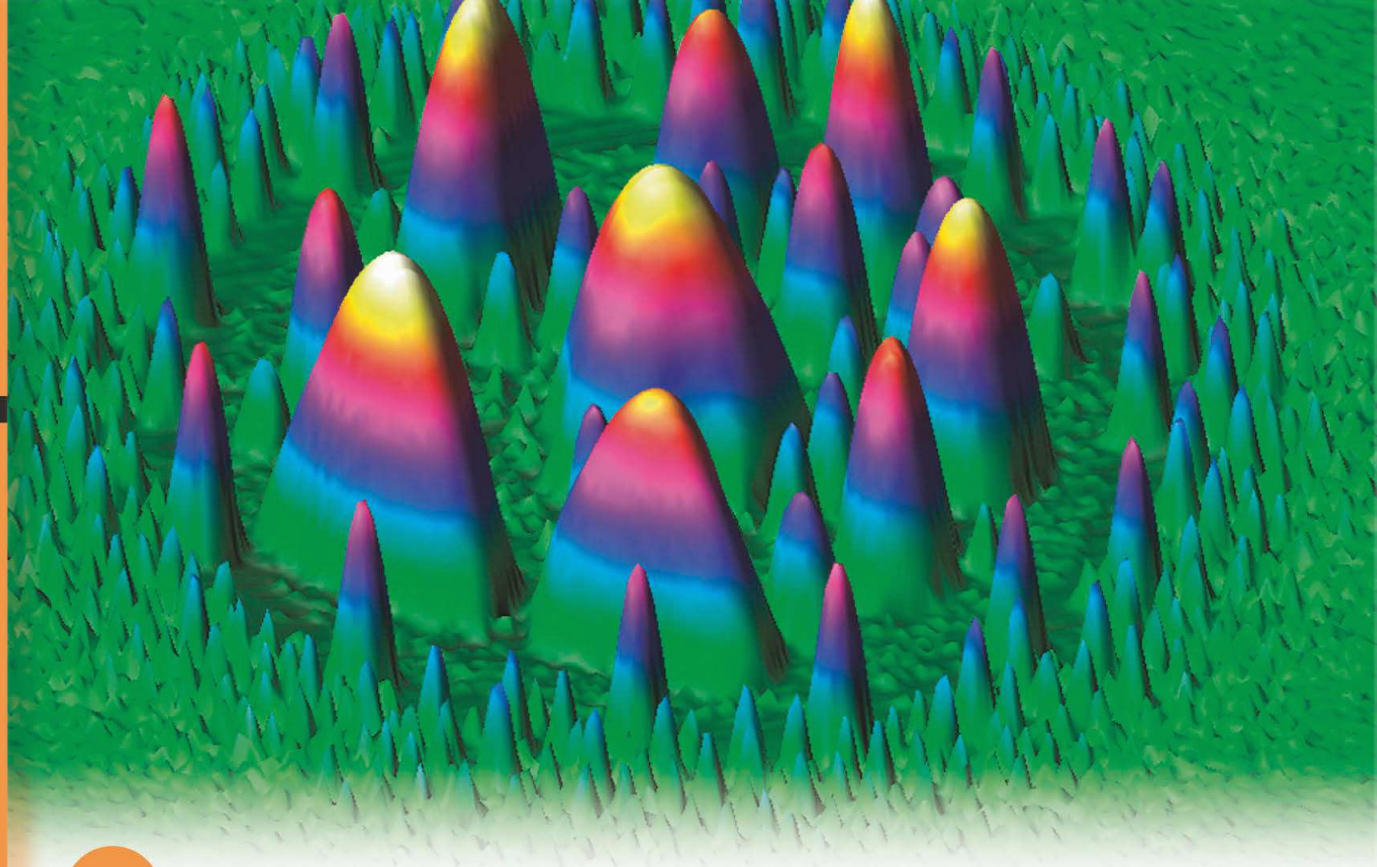
Määritä graafisesti
a) elektronien irrotustyö
b) käytetyn näytteen raja-aallonpituus
c) Planckin vakio.

22. Comptonin ilmiö on todennäköisempi kuin valosähköilmiö, kun tulevan fotonin energia on niin suuri, että elektronien sidosenergia on merkityksettömän pieni verrattuna fotonin energiaan.
Mikä on fotonin aallonpituus, kun sen energia on
a) sidosenergian luokkaa, eli 10 eV
b) satakertainen sidosenergiaan verrattuna?

2 Säteilyä ja ainetta kuvataan useilla malleilla

Nykykäsityksen mukaan kaikilla säteilylajeilla on sekä hiukkas- että aalto-ominaisuuksia.

Tässä luvussa perehdytään säteilyn erilaisiin malleihin, aaltomalliin, hiukkasmalliin ja duaaliseen malliin.

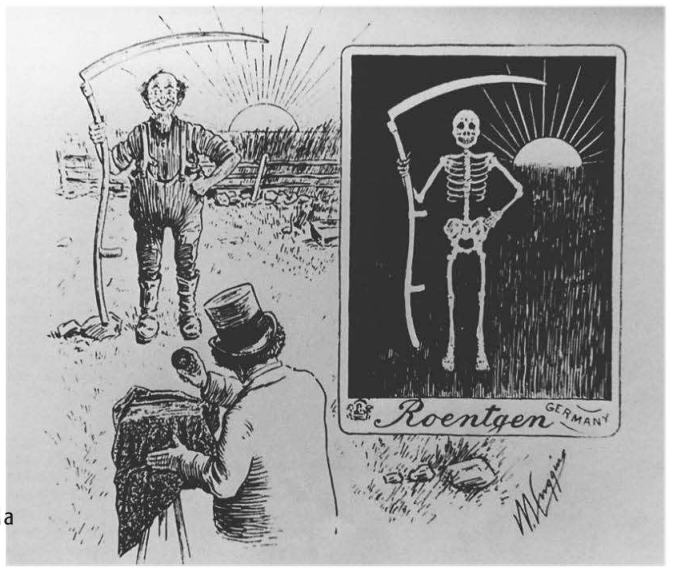


▲ **Kuvassa on yttriumoksidia. Kuva on saatu atomivoima-mikroskoopilla.**

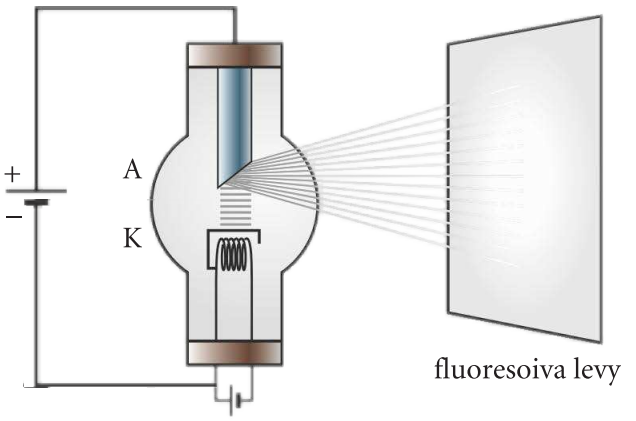
2.1 Röntgensäteily

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on erittäin pieni verrattuna näkyvän valon aallonpituuteen. Röntgensäteilyn löysi Wilhelm Röntgen vuonna 1895. Hän sai tutkimuksistaan ensimmäisen fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1901.

Röntgensäteilyä synnytetään tyhjiöputkissa, joissa on metallista valmistetut anodi ja katodi. Katodi lämpiää, kun siinä on sähkövirta, ja tällöin hehkuvasta katodista irtoaa elektroneja. Kun katodin ja anodin välille kytketään jännite, syntyy sähkökenttä ja katodilta irronneet elektronit kiihtyvät niihin vaikuttavan sähköisen voiman ansiosta. Elektronien nopeus kasvaa suureksi, sillä tyhjiöputkessa ne eivät törmää väliaineen atomeihin. Röntgensäteilyä syntyy, kun suurella nopeudella liikkuvat elektronit jarruuntuvat osuessaan anodimetallin pintaan.



◀ **Röntgenillä ei ollut aavistustakaan, mitä säteilyä tyhjiöputkesta tuli, joten hän nimitti löytämänsä säteilyn X-säteiksi (*X-rays*). X tarkoittaa tässä tuntematonta. Englanninkielisissä maissa röntgensäteilyä kutsutaan yhä tällä nimellä, mutta muualla niitä kutsutaan röntgensäteilyksi.**

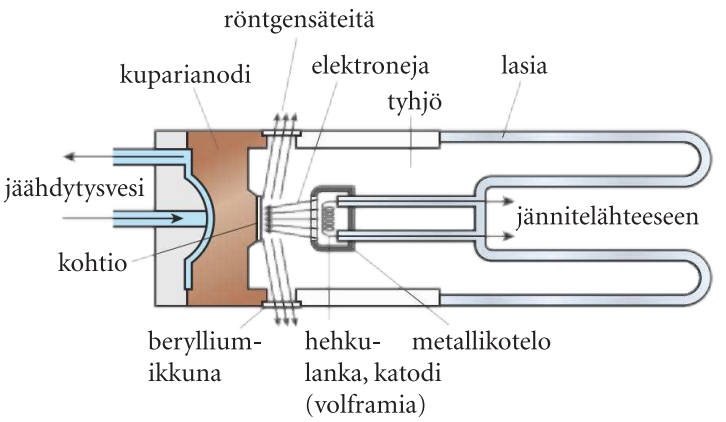


▶ Röntgenputken hehkukatodilta (K) irtoaa elektroneja (katodisäteily), jotka kiihdytetään katodin (K) ja anodin (A) välisellä jännitteellä *U*. Kun elektronit osuvat anodimetalliin, syntyy röntgensäteilyä. Kun röntgensäteily osuu fluoresoivalle levylle, syntyy valoa.

Röntgensäteily kulkee suoraviivaisesti sähkö- ja magneettikentissä sekä läpäisee useimmat kiinteät aineet. Se myös diffraktoituu kapeassa raossa. Diffraktoituminen on tyypillistä aalloille, joten havainnot voidaan tulkita niin, että röntgensäteily on lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä, ja sen aallonpituus on suuruusluokaltaan 10^{-10} m.

Röntgensäteily

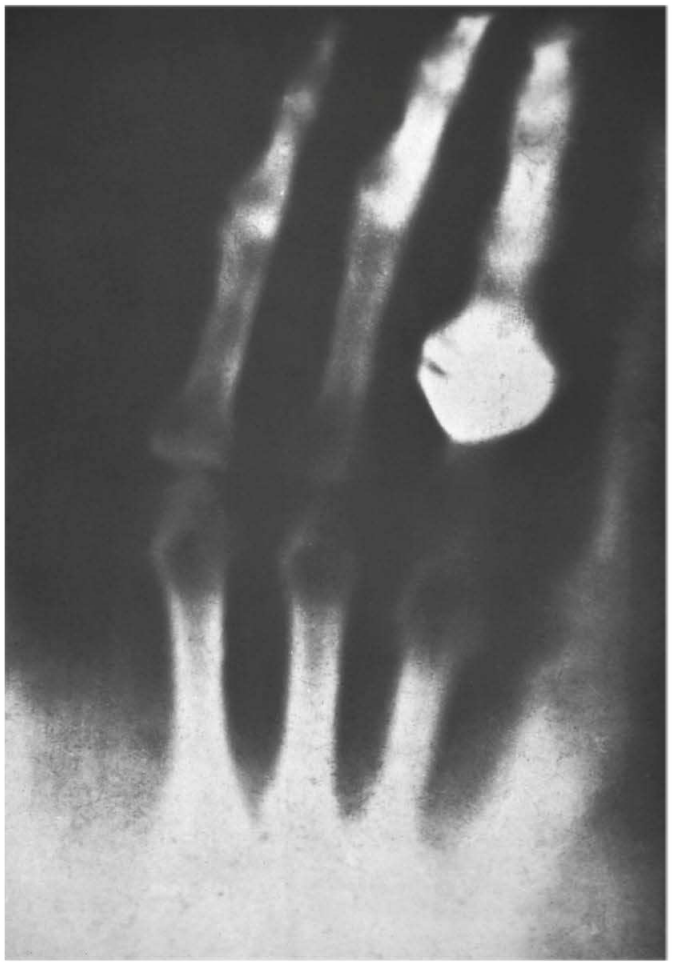
Röntgensäteily on hyvin lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy, kun elektronisuihku osuu metallikohtioon.



▲ Elektronit kiihdytetään suureen nopeuteen sähkökentällä. Vain pieni osa elektronien liike-energiasta muuttuu röntgensäteilyn energiaksi. Suurimman osan liike-energiastaan elektronit luovuttavat anodimateriaalille, jolloin anodi kuumenee merkittävästi. Nykyisissä röntgenputkissa on vesijäähdytys.

Röntgensäteily on sitä lyhytaaltoisempaa ja läpitunkevampaa, mitä suurempaa kiihdytysjännitettä röntgenputkessa käytetään.

Röntgensäteiden läpitunkevuutta hyödynnetään esimerkiksi luuston kuvauksessa. Röntgenkuvaus perustuu röntgensäteilyn erilaiseen absorptioon eri kudoksissa. Luu absorboi säteilyä paremmin kuin sitä ympäröivä pehmytkudos, joten luut näkyvät röntgenkuvissa ympäristöään vaaleampina. Röntgensäteily on suurina annoksina terveydelle vaarallista.



▲ Röntgen kuvasi vaimonsa käden joulukuussa 1895. Röntgensäteilyn lääketieteellinen käyttö alkoi jo muutama kuukausi röntgensäteilyn keksimisen jälkeen.

Esimerkki 1

Röntgensäteilyn aallonpituus on 0,22 nm. Laske tämän säteilyn fotonin
a) energia
b) liikemäärä.

Ratkaisu

a) Valon fotonien energia on

$$E = hf$$
$$= \frac{hc}{\lambda} = \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{0{,}22 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}$$
$$= 5{,}6361\ \text{keV} \approx 5{,}6\ \text{keV} = 9{,}0 \cdot 10^{-16}\,\text{J}.$$

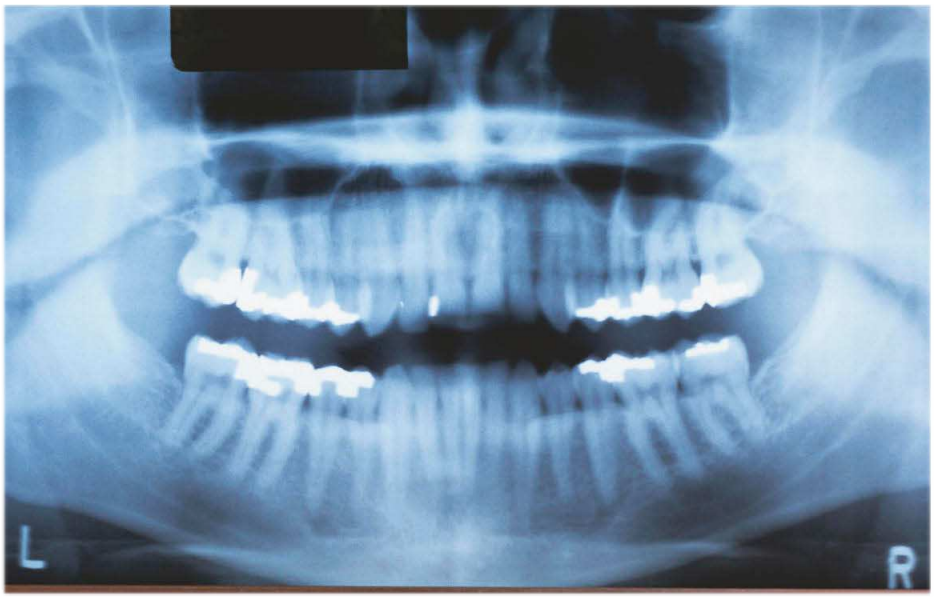
b) Fotonien liikemäärä on

$$p = \frac{h}{\lambda}$$
$$= \frac{6{,}6261 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{0{,}22 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}$$
$$= 3{,}0119 \cdot 10^{-24}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}} \approx 3{,}0 \cdot 10^{-24}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}}.$$

Vastaus

a) Fotonin energia on 5,6 keV.

b) Fotonin liikemäärä on $3{,}0 \cdot 10^{-24}\,\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$.



▲ **Röntgenkuva on hammaslääkärin perustyökalu. Röntgenkuva paljastaa niin alkavat kariekset kuin juurikanavien tulehdukset.**

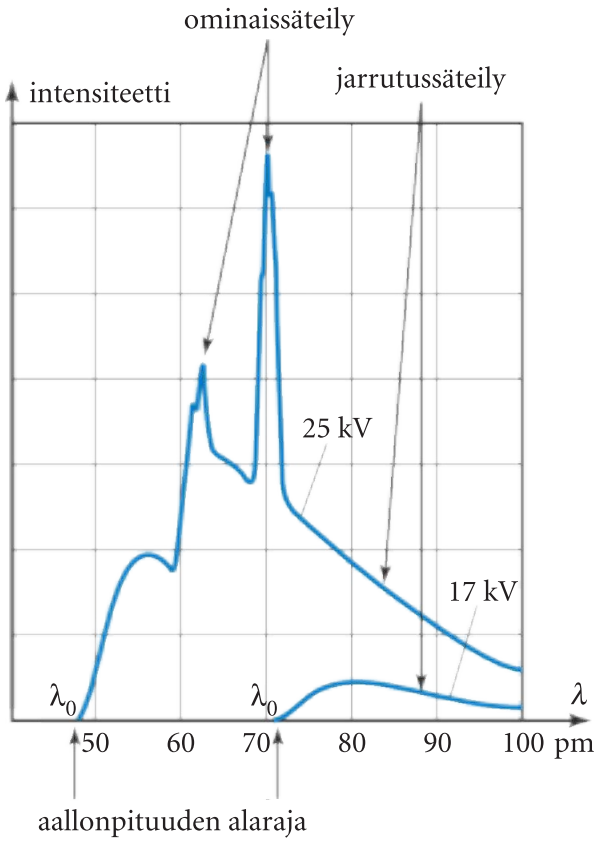
Jarrutussäteily

Pienillä kiihdytysjännitteillä röntgensäteilyn spektri on jatkuva ja tasainen. Kun kiihdytysjännitettä kasvatetaan, spektriin ilmestyy teräviä piikkejä, joiden paikka säilyy mutta intensiteetti kasvaa kiihdytysjännitteen kasvaessa. Piikkien paikat ovat jokaiselle anodiaineelle ominaisia ja siten eri aallonpituuksilla.

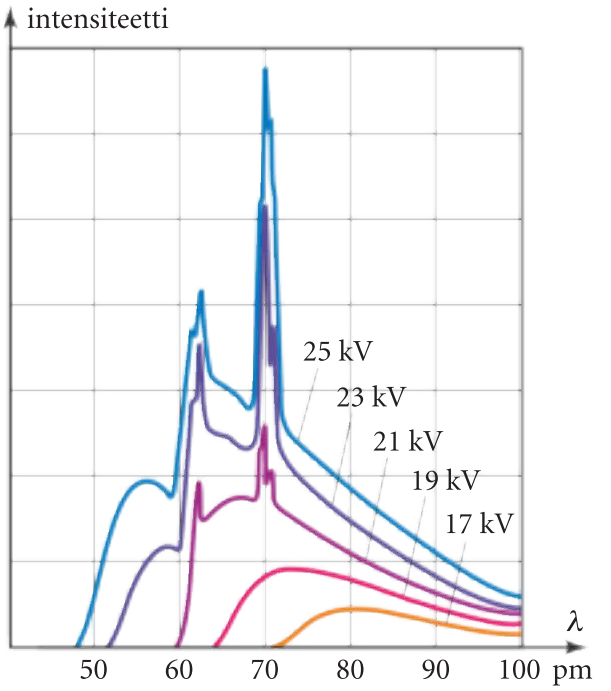
Röntgensäteilyn spektrin muoto voidaan selittää säteilyn syntytavan avulla. Suurella nopeudella anodiin osuvat elektronit jarruuntuvat ja pysähtyvät siihen. Kiihtyvässä liikkeessä olevat elektronit lähettävät sähkömagneettista säteilyä. Elektronien jarruuntumisesta aiheutuva säteily, jota kutsutaan **jarrutussäteilyksi,** aiheuttaa spektrin jatkuvan osan. Spektrin piikit, eli **ominaissäteily**, syntyvät elektronisuihkun törmätessä anodimateriaalin atomeihin. Anodimateriaalin atomirakenne selittää piikkien synnyn. Ominaissäteilyn synty selitetään atomin rakennetta kuvaavan luvun 3 yhteydessä.

Jarrutussäteilyllä on aallonpituuden alaraja λ_0, joka on verrannollinen putken kiihdytysjännitteeseen U.

Valon kvanttiteorian mukaan sähkömagneettinen säteily syntyy kvantteina. Elektronin koko liike-energia tai osa siitä muuttuu säteilykvantin energiaksi, kun elektroni jarruuntuu anodimateriaalin atomien sähkökentässä. Kun elektroni luovuttaa koko liike-energiansa, saadaan säteilykvantin energian suurin mahdollinen arvo $hf_0 = \Delta E_\text{k} = E_\text{k}$, jossa f_0 on aallonpituuden alarajaa λ_0 vastaava taajuus.



▲ **Molybdeenianodin röntgensäteilyspektri röntgenputken kiihdytysjännitteen arvoilla 17 kV ja 25 kV. 17 kV:n jännitteellä syntyy ainoastaan jarrutussäteilyä, mutta 25 kV:n jännitteellä myös ominaissäteilyä.**



▲ **Jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja siirtyy kohden pienempää aallonpituutta, kun kiihdytysjännite kasvaa. Ominaissäteilyn piikit pysyvät paikoillaan.**

Sähköisen voiman tekemä työ lisää elektronin liike-energiaa röntgenputkessa. Työ on $W = Q_e U$, jossa Q_e on elektronin varaus ja U röntgenputken kiihdytysjännite.

Työperiaatteen mukaan elektroni saa liike-energian

$$\Delta E_k = Q_e U.$$

Jos elektroni luovuttaa koko liike-energiansa yhtenä kvanttina, sen energia on

$$hf_0 = Q_e U.$$

Koska $c = \lambda f$,

$$\frac{hc}{\lambda_0} = Q_e U,$$

josta voidaan ratkaista jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja

$$\lambda_0 = \frac{hc}{UQ_e}.$$

Tuloksesta havaitaan, että mitä suurempi kiihdytysjännite U on, sitä pienempi on jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja. Jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja on esimerkki sähkömagneettisen säteilyn energian kvantittumisesta.

Jarrutussäteily

Jarrutussäteilyssä elektronin liike-energia muuttuu kokonaan tai osittain sähkömagneettisen säteilyn kvantin energiaksi.

Esimerkki 2

Röntgenputken jännite on 16 kV. Mitä aallonpituuksia sen lähettämässä jarrutussäteilyssä on?

Ratkaisu

Kun elektroni luovuttaa koko liike-energiansa säteilykvanttina, saadaan säteilykvantin suurin mahdollinen arvo

$$hf_0 = E_k,$$

josta

$$\frac{hc}{\lambda_0} = E_k,$$

f_0 on syntyvän röntgensäteilyn suurin taajuus ja λ_0 pienin aallonpituus.

Sähkökentän tekemä työ kasvattaa elektronin liike-energiaa, joten työperiaatteen mukaan

$$E_k = Q_e U.$$

Yhtälöt yhdistämällä saadaan

$$\frac{hc}{\lambda_0} = Q_e U,$$

josta ratkaistaan λ_0

$$\lambda_0 = \frac{hc}{Q_e U}$$

$$= \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\text{eVs} \cdot 2{,}998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\text{ e} \cdot 16 \cdot 10^3\text{V}}$$

$$= 7{,}7496 \cdot 10^{-11}\text{m} \approx 77\text{ pm}.$$

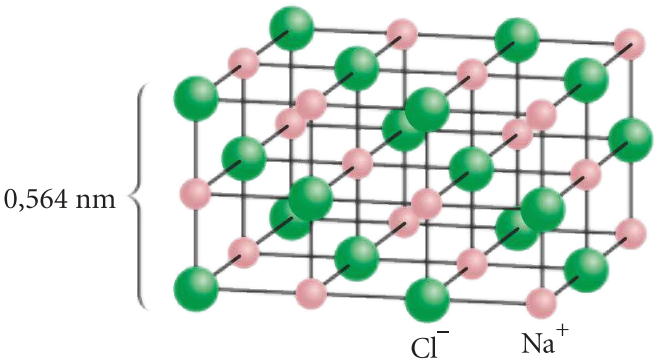
Vastaus

Säteilyssä on aallonpituutta 77 pm pidempiä aallonpituuksia.

Röntgendiffraktio

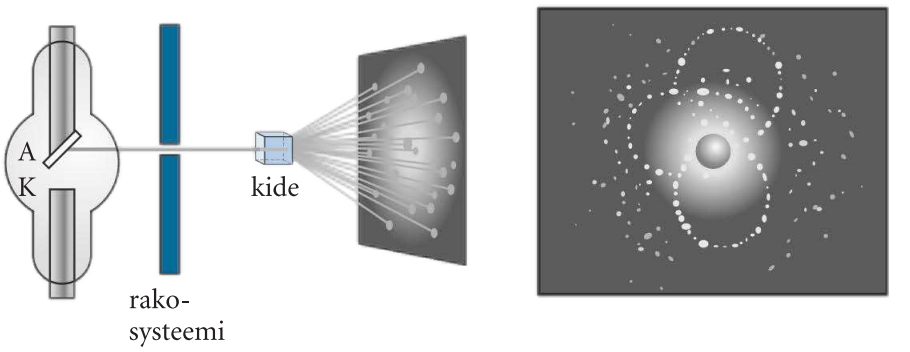
Aallot-kurssilla opittiin, että aaltorintaman muoto muuttuu merkittävästi, eli se diffraktoituu, kun aaltorintama kulkee sellaisen aukon läpi, jonka leveys on aallonpituuden luokkaa.

Monien aineiden rakenne on säännöllinen. Esimerkiksi suolojen ja metallien rakenne on kiderakenne, jossa aineen atomit tai molekyylit ovat järjestyneet säännöllisiksi atomitasoiksi.



◀ Ruokasuolan NaCl kiderakenne on kuutiollinen. Atomitasojen etäisyys toisistaan on 0,282 nm.

Röntgensäteilyn aallonpituus on samaa suuruusluokkaa kuin atomien välimatkat kiteissä. Kun kiteeseen osuu röntgensäteilyä, havaitaan, että varjostimena olevalle filmille syntyy teräviä interferenssimaksimeja. Maksimit syntyvät, kun kiteestä diffraktoitunut säteily interferoi vahvistavasti.

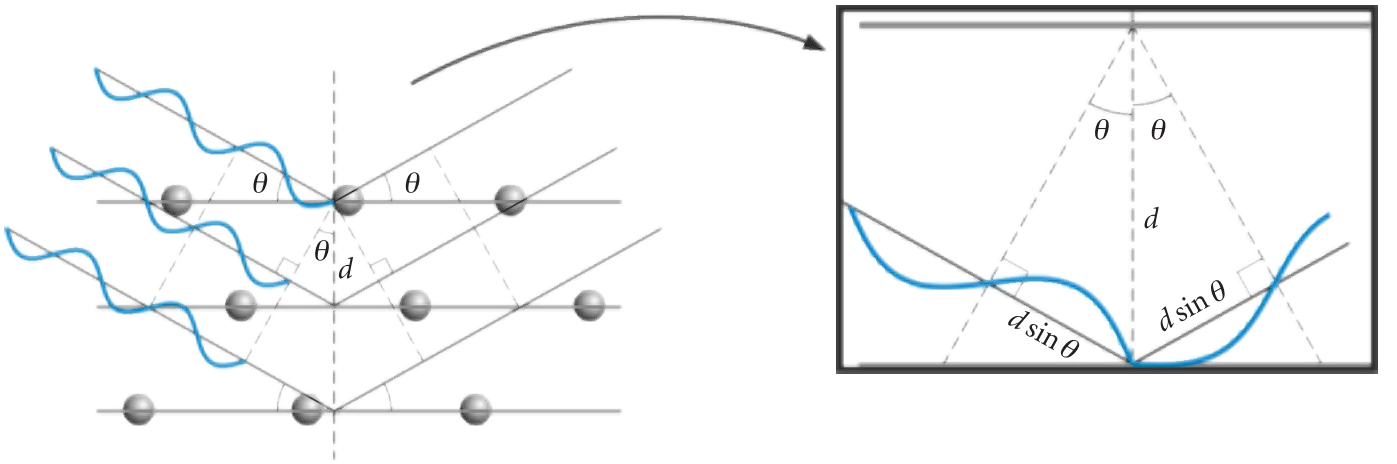


▲ Varjostimella havaitaan useita interferenssimaksimeja, kun röntgensäteily osuu kiteeseen.

Röntgensäteilyn diffraktioilmiöt kiteessä voidaan selittää siten, että kide toimii kuin hila. Hiloja käsiteltiin Aallot-kurssin luvussa 4.

Kiteessä aineen atomit tai molekyylit ovat järjestyneet säännölliseksi rakennelmaksi, jota sanotaan **hilaksi**. Kiteen atomitasot toimivat heijastavina **hilatasoina** röntgensäteilylle.

Röntgensäteilylle saadaan **vahvistava interferenssi**, kun säteily heijastuu kiteen kahdesta eri atomitasosta siten, että matkaero on säteilyn aallonpituuden monikerta. Vahvistusehtoa kutsutaan Braggin laiksi keksijänsä W. L. Braggin mukaan.



▶ **Hilatasojen välimatka on *d*. Heijastuneiden säteiden matkaero on $2d \sin\theta$. Vahvistava interferenssi saadaan, kun matkaero $2d \sin\theta = n\lambda$.**

Braggin laki

Röntgensäteily, jonka aallonpituus on λ, heijastuu hilatasoista, joiden välimatka on d, lain

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

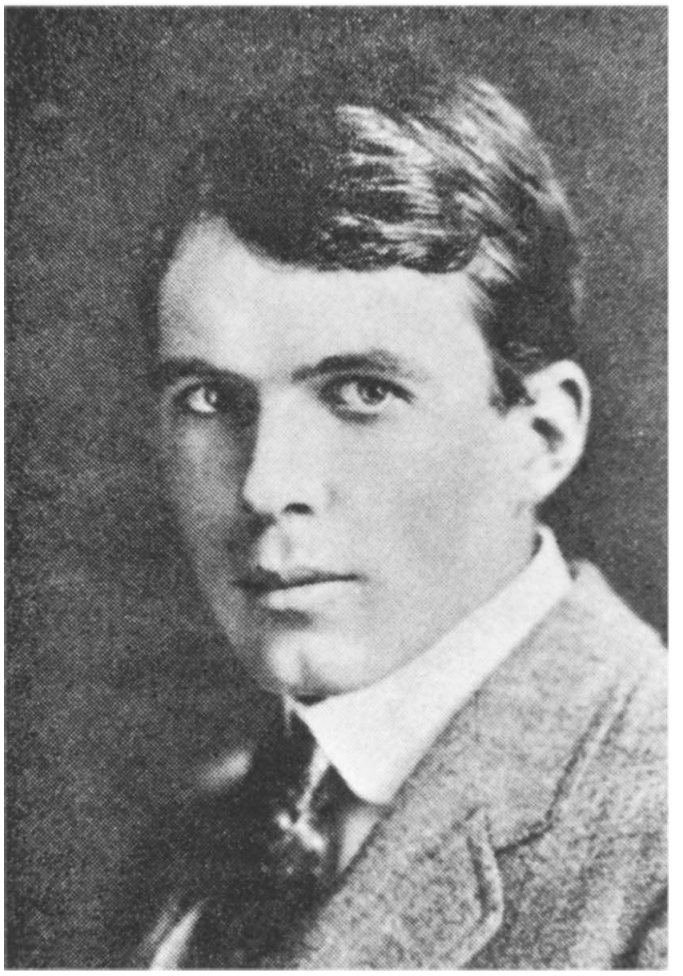
määräämiin suuntiin, jossa

θ on syntyvän maksimin heijastuskulma ja

$n = 1, 2, \ldots$ on heijastuksen kertaluku.

Kiteissä tapahtuvalla röntgensäteilyn diffraktiolla on ollut suuri merkitys kiteisten aineiden rakenteen selvittämisessä. Röntgensäteilyn aallonpituus on riittävän lyhyt, jotta sen avulla voidaan ”nähdä”, kuinka atomit ovat sijoittuneet kiteeseen. Tuntemattoman kiteen rakenne voidaan määrittää mittaamalla tunnetun röntgensäteilyn diffraktiomaksimien suunnat ja intensiteetit. Nykyinen käsitys aineen atomi- ja molekyylirakenteesta perustuu pääosin röntgensäteilyn antamaan tietoon. Myös DNA:n rakenne selvisi röntgendiffraktion avulla.

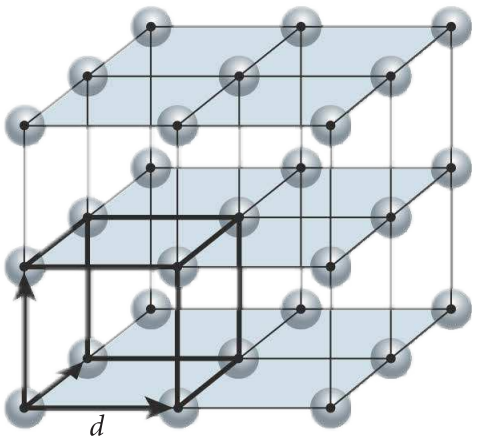
Röntgensäteilystä voidaan erottaa haluttu aallonpituus, kun käytetään hyväksi tunnetusta kiteestä saatavaa voimakasta diffraktiomaksimia.



◀ **W. L. Bragg sai kiteiden rakenteita koskevista tutkimuksistaan Nobelin palkinnon vuonna 1915, yhdessä isänsä W. H. Braggin kanssa.**

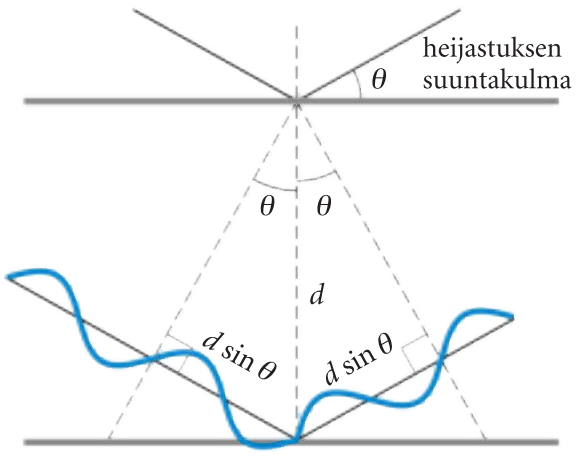
Esimerkki 3

Kiteen atomit ovat järjestyneet kuvan osoittamalla tavalla kuutiolliseksi hilaksi.



Kahden hilatason etäisyys, eli hilavakio *d*, on 0,256 nm. Kiteeseen suunnataan monokromaattinen röntgensäteily, jonka aallonpituus on 0,154 nm. Määritä heijastusten suuntakulmat atomien muodostaman kuution, eli yksikkökopin, särmää vastaan kohtisuorista hilatasoista (varjostetut tasot).

Ratkaisu



Braggin lain mukaan

$$2d\sin\theta = n\lambda\,.$$

Ratkaistaan tästä

$$\sin\theta = \frac{n\lambda}{2d}.$$

Kun $n = 1$ saadaan

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} = \frac{0{,}154\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}}{2\cdot0{,}256\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}} = 0{,}301$$
$$\theta = 17{,}50^\circ.$$

Kun $n = 2$ saadaan

$$\sin\theta = \frac{2\lambda}{2d} = \frac{0{,}154\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}}{0{,}256\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}} = 0{,}602$$
$$\theta = 36{,}98^\circ.$$

Kun $n = 3$ saadaan

$$\sin\theta = \frac{3\lambda}{2d} = \frac{3\cdot0{,}154\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}}{2\cdot0{,}256\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}} = 0{,}902$$
$$\theta = 64{,}47^\circ.$$

Kun $n = 4$ saadaan

$$\sin\theta = \frac{4\lambda}{2d} = \frac{2\cdot0{,}154\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}}{0{,}256\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}} = 1{,}203 > 1.$$

Koska $\sin\theta$ ei voi olla suurempi kuin yksi, neljännen kertaluvun heijastusta ei nähdä.

Vastaus

Heijastusten suuntakulmat ovat 17,50°; 36,98° ja 64,47°.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

2.2 Aaltohiukkasdualismi

1920-luvulla alkoi uuden fysiikan teorian, **kvanttimekaniikan**, kehitys. Sen mullistava ajatus on, että hiukkasilla, kuten elektroneilla ja protoneilla, havaitaan tietyissä tilanteissa aaltoluonne.

Hiukkasilla on myös aaltoluonne

Ranskalainen Louis de Broglie esitti vuonna 1924, että hiukkasilla on myös aaltoluonne. De Broglien päättely perustui ajatukseen luonnon symmetrisyydestä. Valolla on dualistinen luonne, eli se käyttäytyy tietyissä tilanteissa kuin aalto ja toisissa kuin hiukkanen. Jos luonto on symmetrinen, pitäisi dualistisen luonteen näkyä myös hiukkasilla. Elektronien ja protonien, joita yleensä pidetään hiukkasina, pitäisi käyttäytyä tietyissä tilanteissa ikään kuin aallot.

Klassisessa fysiikassa säteilyn lajit jaetaan hiukkassuihkuihin ja aaltoliikkeisiin. Aaltoja ovat esimerkiksi valo, radioaallot, infrapunasäteily ja röntgensäteily. Hiukkassuihkuja ovat esimerkiksi elektronisuihkut, alfasäteily, ionisuihkut ja neutronisäteily.

Säteilyn lajien luokittelusta hiukkasiin ja aaltoihin oli luovuttava kokeellisten havaintojen myötä. Kaikilla säteilylajeilla on sekä aaltoliikkeelle että hiukkassuihkulle ominaisia piirteitä. Tätä kokeellisesti todennettua asiaa alettiin kutsua **aaltohiukkasdualismiksi**. Aalto- ja hiukkaspiirteitä yhdistävät seuraavat de Broglien kaksi lakia.

▶ Louis de Broglie sai vuonna 1929 fysiikan Nobelin palkinnon teoreettisista tutkimuksistaan, jotka koskivat elektronien aaltoluonnetta. De Broglien kaukainen esi-isä Jeppe Kurki oli Laukon Kartanon isäntä 1400-luvulla.

De Broglien lait

Kaikilla säteilyn lajeilla on sekä aalto- että hiukkasominaisuuksia. Säteilyn liikemäärälle ja energialle on voimassa

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ ja}$$

$$E = hf,$$

jossa

- h on Planckin vakio ja
- f on säteilyn taajuus ja
- λ on sen aallonpituus.

De Broglien lait kytkevät yhteen säteilyn aallonpituuden λ ja taajuuden f säteilyn hiukkasten liikemäärään p ja energiaan E.

Esimerkki 1

Selvitä de Broglien lakien avulla elektronin aallonpituus, kun elektronien nopeus on $4{,}35 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ratkaisu

Elektronin liikemäärä voidaan lausua kahdella tavalla

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ja} \quad p = mv,$$

jossa m on elektronin massa, v on sen nopeus ja λ on aallonpituus. Tästä saadaan

$$mv = \frac{h}{\lambda}$$

ja tästä aallonpituus

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Sijoitetaan arvot

$$\lambda = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{9{,}109 \cdot 10^{-31}\text{kg} \cdot 4{,}35 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$= 1{,}6722 \cdot 10^{-10}\,\text{m} \approx 0{,}167\ \text{nm}.$$

Vastaus

Elektronin aallonpituus on 0,167 nm, kun sen nopeus on $4{,}35 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Esimerkki 2

Elektronisuihku on kiihdytetty röntgenputkessa 2,2 kV:n jännitteellä. Laske elektronien aallonpituus.

Ratkaisu

Liike-energian yhtälö on

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2.$$

Työperiaatteen mukaan

$$\Delta E_k = W$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = Q_e U,$$

josta ratkaistaan nopeus

$$v = \sqrt{\frac{2Q_e U}{m}}.$$

Sijoitetaan arvot

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6021 \cdot 10^{-19}\text{C} \cdot 2{,}2 \cdot 10^{3}\text{V}}{9{,}109 \cdot 10^{-31}\text{kg}}}$$

$$= 2{,}78186 \cdot 10^{7} \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Elektronien nopeus on pieni verrattuna valonnopeuteen, joten ratkaisussa voidaan käyttää klassisen mekaniikan liike-energian lauseketta.

Lasketaan seuraavaksi elektronien aallonpituus

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$= \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{9{,}1094 \cdot 10^{-31}\,\text{kg} \cdot 2{,}78186 \cdot 10^{7}\,\frac{\text{m}}{s}}$$

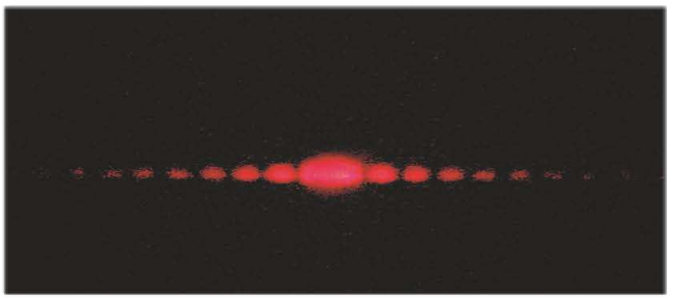
$$= 2{,}6147 \cdot 10^{-11}\,\text{m} \approx 26{,}1\ \text{pm}.$$

Vastaus

Elektronin aallonpituus on 26,1 pm.

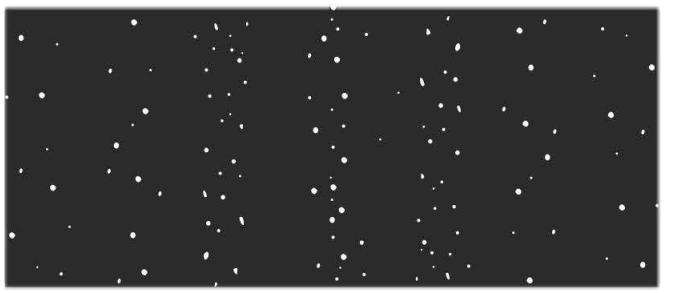
Valon ja elektronien käyttäytyminen kaksoisraossa

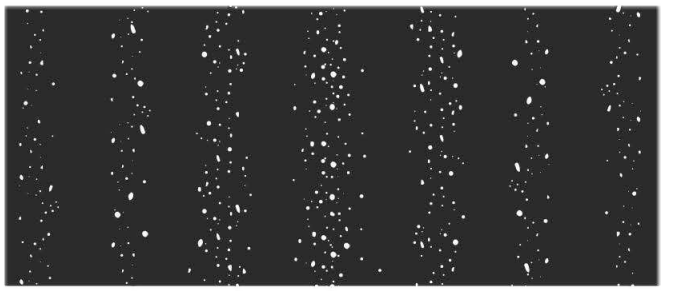
Tarkastellaan ensin **monokromaattisen valon** diffraktiota kaksoisraossa. Aallot-kurssissa osoitettiin, että varjostimelle syntyy interferenssikuvio, jossa keskellä on valoisa päämaksimi ja sivuilla useita valoisia sivumaksimeja.

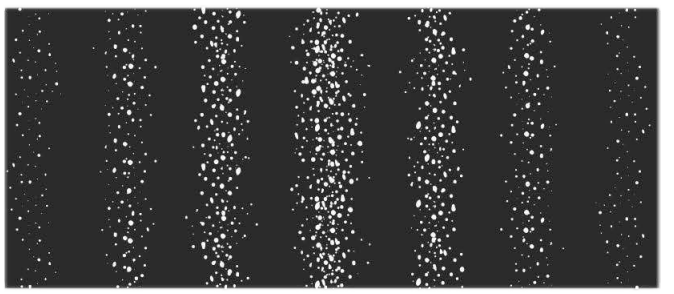


Laservalon interferenssikuvio kaksoisrakokokeessa.

Vaihdetaan seuraavaksi varjostimen paikalle fluoresoiva pinta. Kun koetta jatketaan erittäin heikolla valolla, ilmestyy fluoresoivalle pinnalle sinne tänne yksittäisten fotonien osumakohtia. **Koe osoittaa, että valo ei käyttäydy niin kuin klassisen fysiikan aalto.** Vasta kokeen jatkuessa tarpeeksi pitkään muodostuu tyypillinen interferenssikuvio.



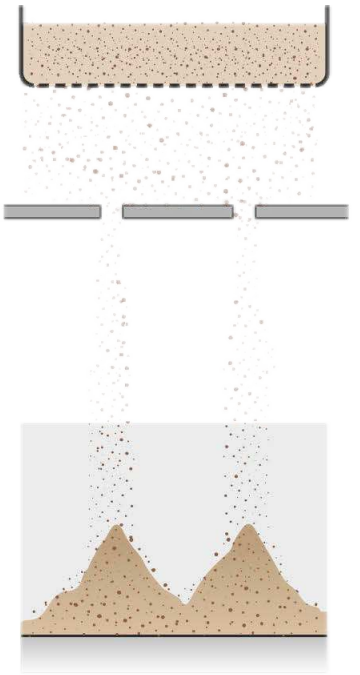




Kun kaksoisrakokoe tehdään erittäin heikolla valolla, ilmestyy fluoresoivalle pinnalle ensin sinne tänne yksittäisten fotonien osumakohtia. Vasta kokeen jatkuessa tarpeeksi pitkään muodostuu valolle tyypillinen interferenssikuvio.

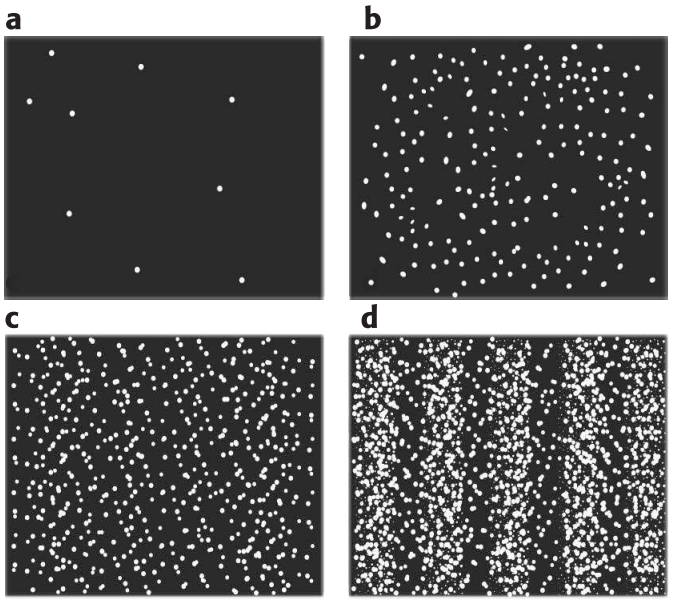
Tarkastellaan seuraavaksi **elektronisuihkun** käyttäytymistä kaksoisraossa. Jos elektronien ajatellaan olevan hiukkasia, niin voisi olettaa, että varjostimella näkyisi kaksi erillistä maksimia rakojen kohdalla. Tilanne vastaisi hiekanjyvien pudottamista kahdesta raosta alustalle.

▶ **Putoavat hiekanjyvät muodostavat kaksoisrakokokeessa kaksi kekoa.**



Kokeellisesti on osoitettu, että elektroneille havaitaan samanlainen yksittäisistä osumista koostuva interferenssikuvio kuin fotoneillakin.

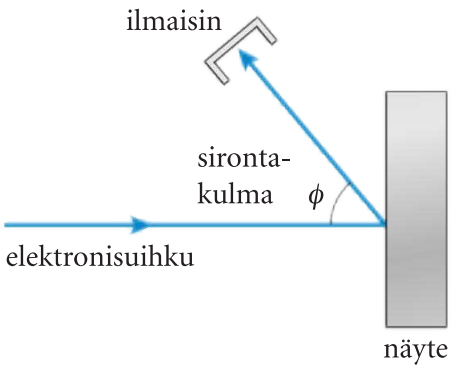
▶ **Kun kaksoisrakokoe tehdään yksittäisiä elektroneja käyttäen, varjostimella nähdään ensin mielivaltaisissa paikoissa yksittäisiä pisteitä (kuva a). Interferenssikuvio tulee näkyviin vasta ajan mittaan (kuva d). Tässä koejärjestelyssä kaksoisraon läpi kulki vai yksi elektoni kerrallaan, joten yksittäisellä elektronilla on aaltoluonne.**

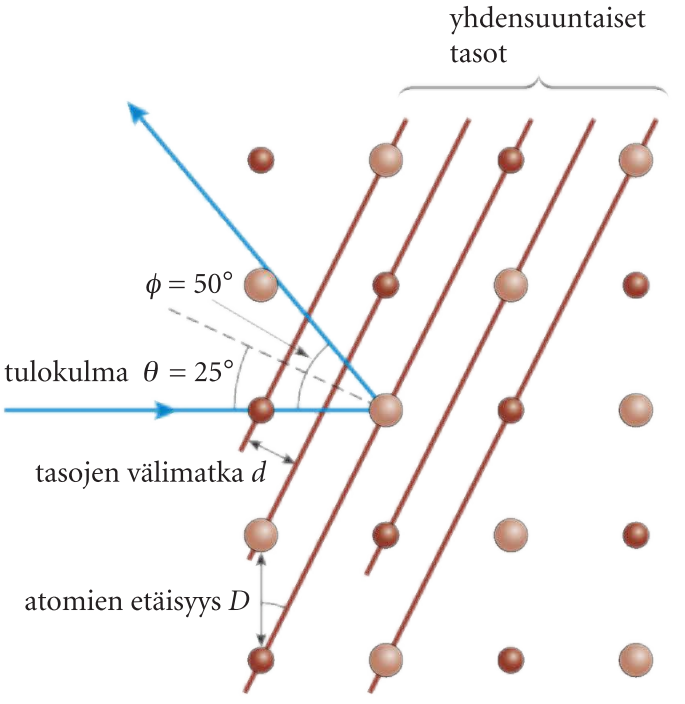


Koe osoittaa, että elektroni ei käyttäydy niin kuin klassisen fysiikan hiukkanen. Yksittäisillä elektroneilla on aalto-ominaisuus. Hiukkasilmaisimilla voidaan määrittää elektronien liikemäärä ja energia. Kokeelliset tulokset osoittavat, että mitatut elektronien liikemäärä ja energia vastaavat de Broglien lakien ennusteita.

Elektronisironta metallista

Hiukkasten aalto-ominaisuudet havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1927 Clinton Davissonin ja Lester Germerin tekemässä kokeessa. He pommittivat elektroneilla sinkkilevyä, jolla oli säännöllinen kidemuoto.





▲ **Davisson–Germerin kokeessa tutkittiin elektronien siroamista sinkkimetallin pinnasta.**

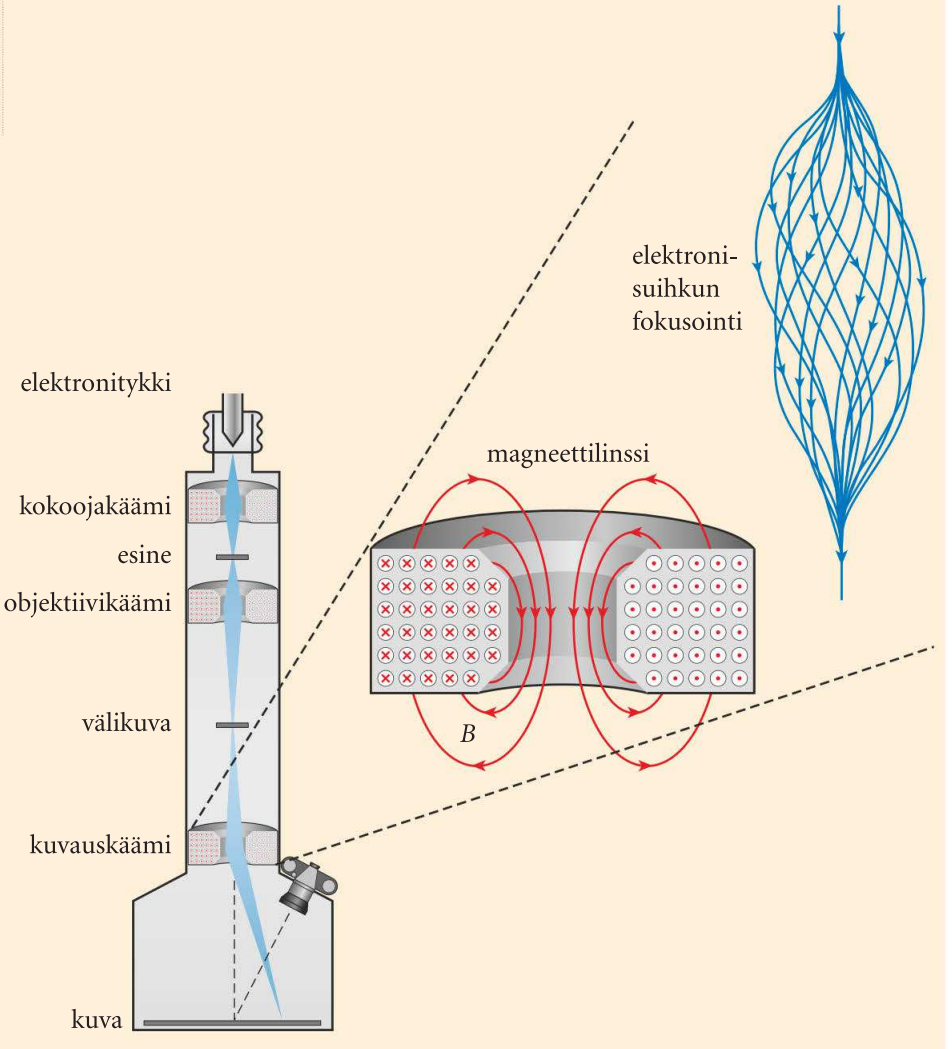
He havaitsivat tarkoissa tutkimuksissa useita intensiteettimaksimeita. Interferenssikuvio oli samankaltainen kuin röntgendiffraktiossa sinkille saatu vastaava kuvio.

Davisson ja Germer käyttivät Braggin lakia ratkaistakseen elektronin aallonpituuden. He saivat aallonpituudeksi 0,165 nm, kun elektronien nopeus oli $4{,}35 \cdot 10^6 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Elektronit siis todella diffraktoituivat metallihilassa, joten ne käyttäytyivät tässä kokeessa samalla tavalla kuin aallot.

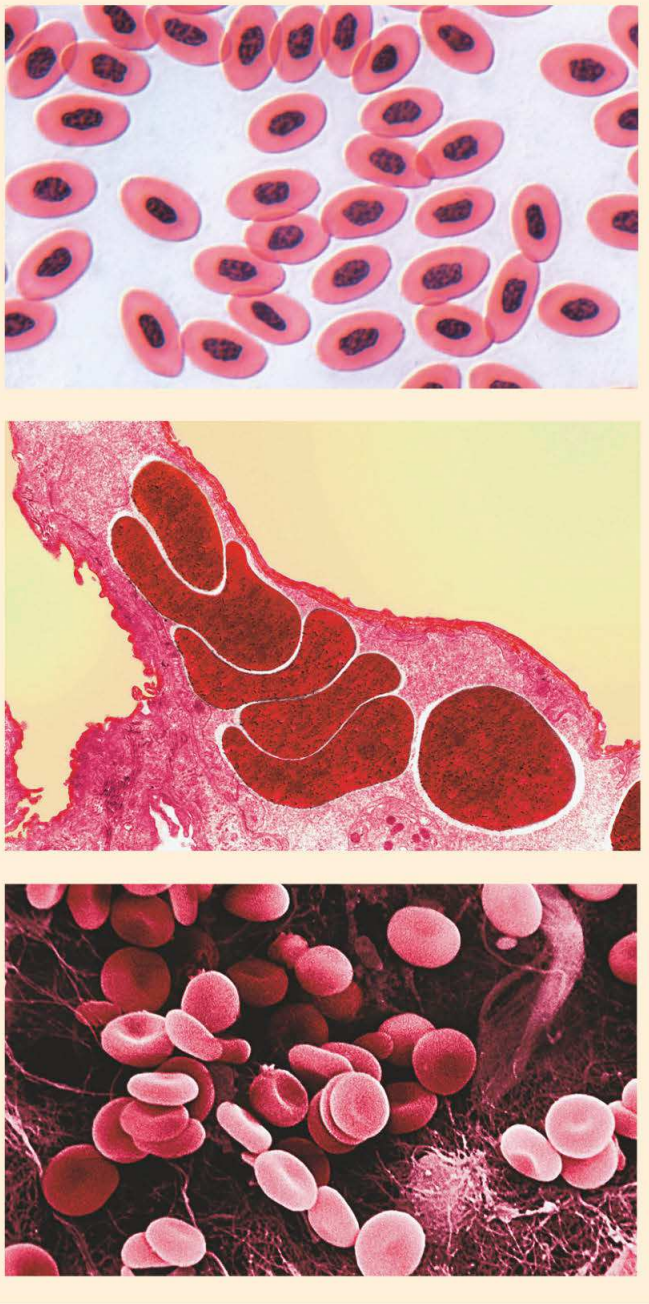
Mikroskoopilla voidaan erottaa vain yksityiskohtia, jotka ovat käytettyä säteilyn aallonpituutta suurempia. Elektronimikroskoopissa valo on korvattu elektronisuihkulla. Koska elektronien de Broglien aallonpituus on huomattavasti pienempi kuin näkyvän valon aallonpituus, noin tuhannesosa siitä, elektronimikroskoopin erotuskyky on huomattavasti parempi kuin valomikroskoopin erotuskyky. Aallonpituus on sitä pienempi, mitä suurempi elektronien energia kiihdytyksen jälkeen on. Elektronit on helppo kiihdyttää nopeuksiin, joissa de Broglien aallonpituus on pienempi kuin aineen atomien välimatka. Tavallisen elektronimikroskoopin tyypillinen erotuskyky on luokkaa 1 nm.

Läpäisyelektronimikroskoopissa elektronisuihku menee näytteen läpi, kun taas pyyhkäisyelektronimikroskoopissa elektronit heijastuvat näytteen pinnasta, joka on käsitelty esimerkiksi kullalla. Nykyaikaisissa laitteissa kuva tuotetaan digitaalisesti, jolloin sitä voidaan tutkia tietokoneen näyttöpäätteeltä. Useimmiten kuvat värjätään kuvankäsittelyohjelmalla.

Elektronimikroskooppi on tärkeä apuväline mm. nanoteknologiassa, lääketieteessä ja biologiassa. Sillä selvitetään esimerkiksi solun rakennetta ja erilaisten pintojen rakennetta.



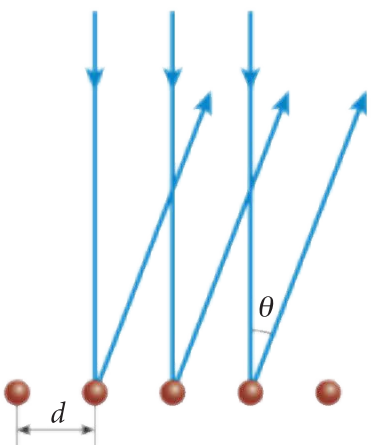
▲ Läpäisyelektronimikroskooppi toimii hyvin samankaltaisesti kuin valomikroskooppi. Elektronisuihkuja kohdistetaan magneettilinsseillä.



◄ Veren punasoluja valomikroskoopilla kuvattuna (yläkuva). Keskimmäinen kuva on kuvattu punasolusta läpäisyelektronimikroskoopilla ja alin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Elektronimikroskooppikuvat on värjätty.

Esimerkki 3

Matalaenergisten elektronien diffraktiokokeessa (LEED) elektronisuihku osuu kohtisuorasti piikiteen pintaan. Vierekkäisistä pinta-atomeista täysin kimmoisasti sironneessa elektronisuihkussa havaitaan ensimmäisen kertaluvun intensiteettimaksimi 21°:n kulmassa (θ) pinnan normaaliin nähden. Laske vierekkäisten pinta-atomien välinen etäisyys (d), kun tulevan suihkun elektronien energia on 79 eV. (Yo syksy 2002, teht. 12)



Ratkaisu

Elektronit diffraktoituivat metallihilassa, joten ne käyttäytyvät samalla tavalla kuin aallot. Ensimmäisen kertaluvun maksimi havaitaan suunnassa, jossa heijastuneiden säteiden matkaero on elektronin yksi de Broglien aallonpituus

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Elektronin liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2.$$

Ratkaistaan liikemäärä p

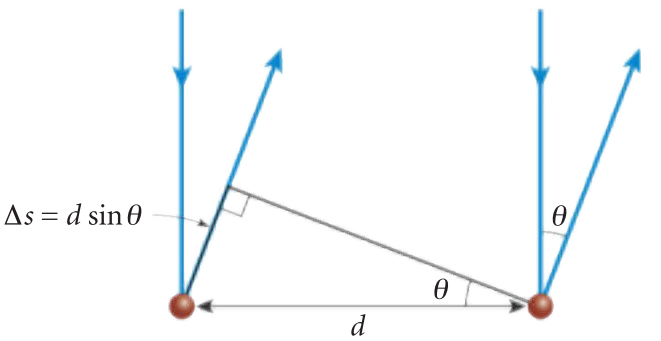
$$mE_k = \frac{1}{2}m^2v^2 = \frac{1}{2}p^2$$

josta

$$p = \sqrt{2mE_k}.$$

Kun liikemäärä sijoitetaan de Broglien aallonpituuden lausekkeeseen, saadaan

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}.$$



Kuviosta saadaan matkaeroksi $\Delta s = d\sin\theta$. Kun matkaero on yksi elektronin de Broglien aallonpituus, havaitaan ensimmäisen kertaluvun intensiteettimaksimi, joten

$$d\sin\theta = k\lambda, \text{ jossa } k = 1.$$

Sijoitetaan lausekkeeseen ratkaistu de Broglien aallonpituus, jolloin saadaan

$$d\sin\theta = k\frac{h}{\sqrt{2mE_k}},$$

josta

$$d = \frac{kh}{\sin\theta \cdot \sqrt{2mE_k}}$$

$$= \frac{1 \cdot 6{,}6261 \cdot 10^{-34}\text{Js}}{\sin 21° \cdot \sqrt{2 \cdot 9{,}109 \cdot 10^{-31}\text{kg} \cdot 79 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\text{J}}}$$

$$= 3{,}8503 \cdot 10^{-10}\text{m} \approx 3{,}9 \cdot 10^{-10}\text{m} = 0{,}39\text{ nm}.$$

Vastaus

Pinta-atomien välinen etäisyys on 0,39 nm.

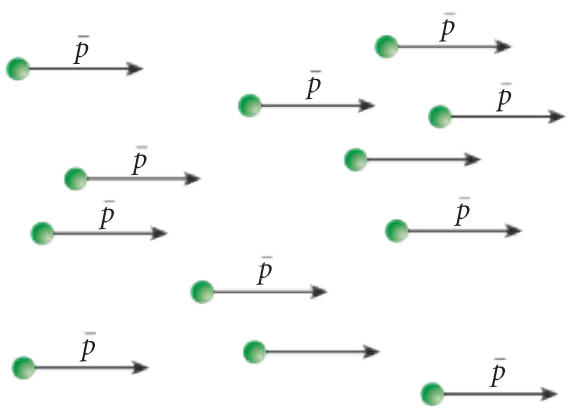
Tehtäviä ➢ 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17

2.3 Aineen ja säteilyn duaalinen malli

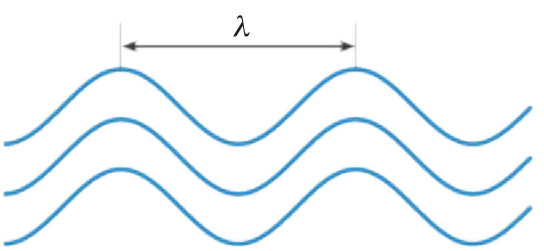
Ennen modernin fysiikan vallankumousta 1900-luvun alussa väiteltiin siitä, **onko** valo aaltoliikettä vai **koostuuko** se hiukkasista. Hiukkasten, kuten elektronien ja protonien, luonnetta pidettiin sen sijaan selvänä. De Broglien alulle panema mullistus hiukkasten olemuksesta osoitti, että hiukkastenkin luonne on ongelmallinen.

Hiukkas- ja aaltomalli

On vaikea uskoa, että elektronit ja valo voisivat olla samalla kertaa sekä aaltoja että hiukkasia. Niin ei olekaan, sillä **hiukkanen** ja **aalto** ovat kaksi konkreettisiin mielikuviin perustuvaa havainnollista **mallia**, joilla esitetään havaittuja ilmiöitä. Tietyissä ilmiöissä valoa kuvataan hiukkasmallilla ja toisissa aaltomallilla.



▲ **Hiukkasilla on mm. massa, liikemäärä, energia ja varaus. Ne ovat paikallisia ja erillisiä. Hiukkaset liikkuvat omia ratojaan, joita voidaan seurata. Hiukkaset voivat myös törmätä.**



▲ **Aallolla on etenemissuunta, taajuus ja aallonpituus. Aallot interferoivat keskenään.**

Duaalinen malli

Hiukkassuihkun kaksoisrakokokeen tulokset ovat esimerkki ilmiöstä, jota ei voida selittää pelkästään säteilyn hiukkasmallilla eikä myöskään pelkästään aaltomallilla. Koska fluoresoivalla levyllä nähdään yksittäisiä hiukkasten osumia, säteilyn interferenssiä ei voi kuvata pelkästään aaltomallilla. Omia ratojaan pitkin kulkevat hiukkaset eivät interferoi, joten hiukkasmallikaan ei kuvaa kaksoisrakokoetta tyydyttävästi.

Kaksoisrakokokeen tulkitsemiseen tarvitaan **duaalinen malli**, joka huomioi sekä aalloille että hiukkasille ominaiset havainnot.

Duaalisen mallin mukaan hiukkaset voidaan havaita ainoastaan sillä hetkellä ja siinä paikassa, jossa hiukkassäteily osuu kohteeseensa, esimerkiksi fluoresoivaan levyyn tai hiukkasilmaisimeen. Ei voida siis ajatella, että seurataan katodilta irtoavaa tiettyä elektronia, ja havaitaan tämän saman elektronin iskeytyvän ilmaisimeen. Duaalisen mallin mukaan voidaan ajatella, että hiukkaset ilmenevät ainoastaan vuorovaikutustapahtumissa. Elektroni voidaan siten havaita vain, kun se osuu esimerkiksi hiukkasilmaisimeen.

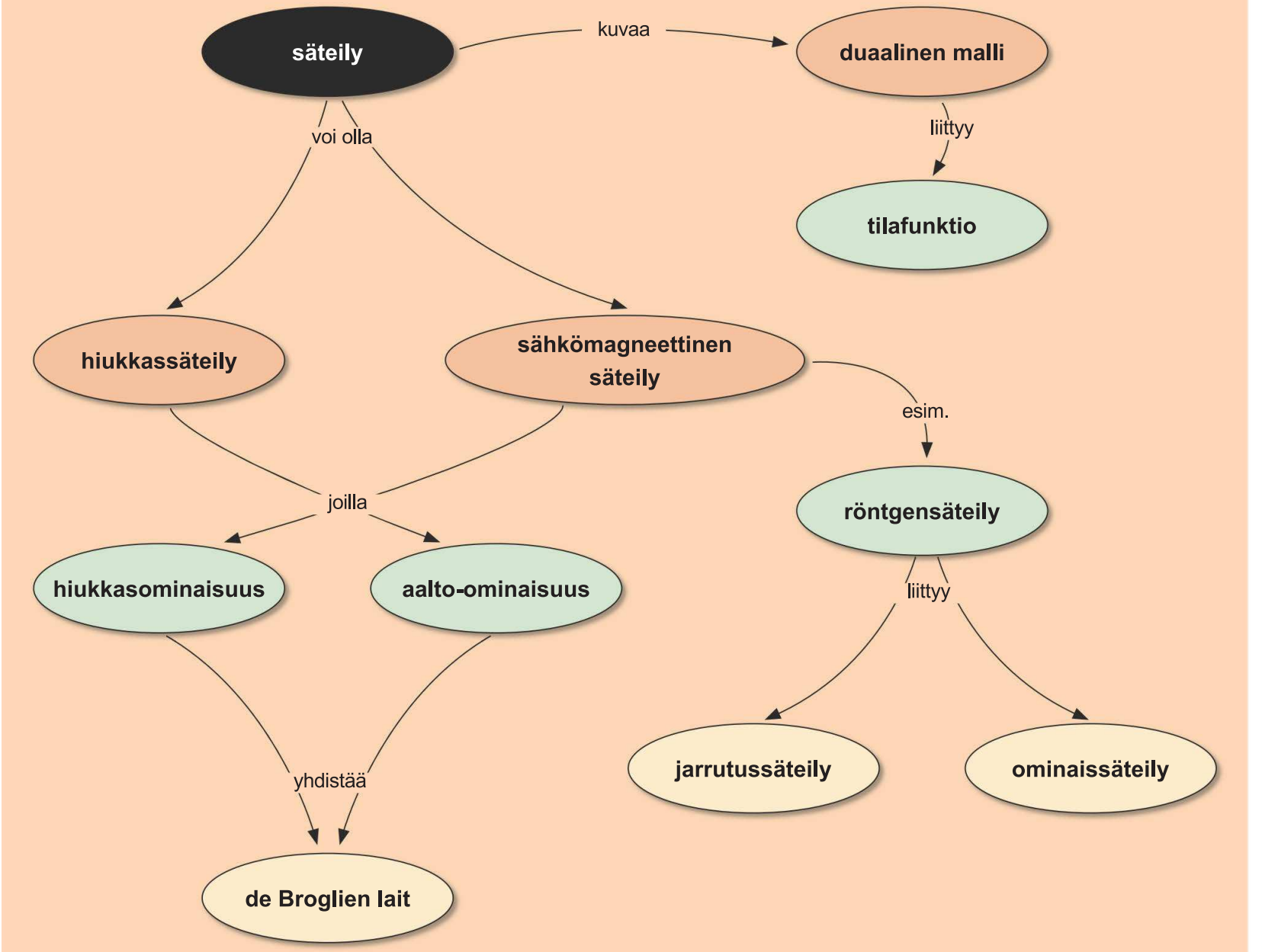
Duaalisen mallin mukaan hiukkassäteilyn aalto-ominaisuudet tulevat näkyviin vasta, kun hiukkasilmaisimeen tai fluoresoivalle levylle osuu riittävän monta säteilyn hiukkasta. Yksittäisen fotonin tai elektronin osumapaikkaa levyllä ei voi tarkasti ennustaa. Interferenssikuvion muoto voidaan selvittää, kun tunnetaan hiukkasen de Broglien aallonpituus ja rakojen ominaisuudet. Säteilyn hiukkasia kuvaa todennäköisyysjakauma, joka ilmoittaa millä todennäköisyydellä hiukkaset havaitaan varjostimen eri kohdissa.

Hiukkas- ja aaltomallien konkreettiset käsitteet, hiukkanen ja aalto, on duaalisessa mallissa korvattava abstraktilla, matemaattisella **tilafunktiolla** $\psi(r)$, jonka neliö $|\Psi(r)|^2$ ilmoittaa hiukkashavaintojen todennäköisyydet.

Säteilyn duaalinen malli

Hiukkaset havaitaan ainoastaan vuorovaikutustapahtumissa. Tilafunktion neliö ilmoittaa hiukkashavaintojen todennäköisyyden.

YHTEENVETO



Tehtäviä ➢ 18, 19, 20, 21, 22, 23

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- röntgensäteily
- de Broglien lait
- kvantittuminen
- duaalinen malli

2.1

1. **a)** Millaista röntgensäteily on verrattuna näkyvään valoon?
b) Miten röntgensäteilyä syntyy?
c) Mihin röntgensäteilyä voidaan käyttää?

2. Mitkä olivat ne havainnot, joiden pohjalta voitiin päätellä, että röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä?

3. Röntgensäteilyn aallonpituus on 0,19 nm. Laske tämän säteilyn fotonin
a) taajuus
b) energia.

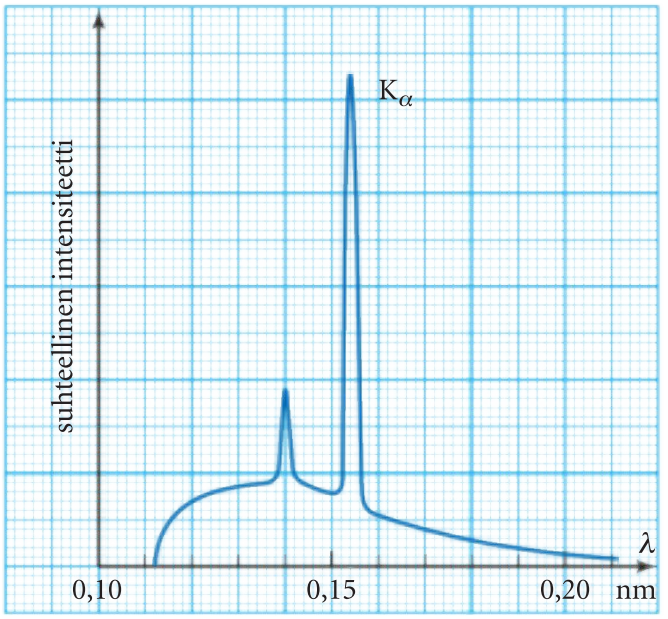
4. **a)** Selosta röntgenputken rakenne pääpiirteissään.
b) Miksi röntgenputkea pitää jäähdyttää?

5. Röntgenputken jännite on 19 kV. Mikä on putken lähettämä lyhin aallonpituus?

6. Mikä on Braggin laki ja mihin sitä voidaan käyttää?

7. Erääseen kiteeseen kohdistetaan röntgensäteilyä. Braggin lain mukaiset ensimmäiset heijastukset havaitaan kulmilla 17,5° ja 36,98°. Millä heijastuskulmalla havaitaan kolmas heijastus?

8. Oheinen kuvio esittää erään röntgenputken lähettämän säteilyn spektriä. Tutki ja perustele, mikä on ollut putken jännite. (Yo kevät 1989, teht. 6a)



9. Kuinka suuri jännite tarvitaan, jotta saataisiin röntgensäteilyä, jonka pienin aallonpituus olisi 0,12 nm?

2.2

10. Mikä on de Broglien lakien keskeinen sisältö?

11. Millaiset kokeet ovat osoittaneet, että materiahiukkasilla on myös aaltoluonne?

12. Miksi elektronimikroskoopilla voidaan erottaa huomattavasti pienempiä yksityiskohtia kuin valomikroskoopilla?

13. Laske de Broglien aallonpituus
a) fotonille
b) elektronille
c) protonille,
kun sen liike-energia on 150 eV.

14. Protonisuihku on kiihdytetty 2,7 kV:n jännitteellä. Laske protonien de Broglien aallonpituus.

15. Luodin massa on 25 g ja nopeus 650 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Laske luodin de Broglien aallonpituus.

16. Kuinka suuri on elektronien aallonpituus, kun ne kiihdytetään elektronimikroskoopissa 130 V:n jännitteellä?

17. Millä jännitteellä elektronimikroskooppia on käytettävä, jos tarkoitus on havaita kohteita, joiden koko on atomin halkaisijan suuruusluokkaa eli 0,1 nm?

2.3

18. Mitä tarkoittaa, kun sanotaan, että jotain kohdetta kuvataan mallilla?

19. Miksi mikromaailman kohteita, kuten valoa ja alkeishiukkasia, on kuvattava malleilla?

20. Miksi voidaan sanoa, että elektroni ei ole hiukkanen eikä aalto?

21. Missä ilmiössä elektronia voidaan kuvata
a) hiukkasmallilla
b) aaltomallilla?

22. Miten elektroneja kuvaava duaalinen malli poikkeaa hiukkasmallista?

23. Miten duaalisen mallin aaltoliike poikkeaa aaltomallin aaltoliikkeestä?

3 Atomin malli

Atomin mittakaavassa tapahtuvat ilmiöt selitetään kvanttimekaniikan avulla. Kvanttimekaniikka on teoria, joka toimii hämmästyttävällä tarkkuudella. Se selittää muun muassa, miten kemiallinen sidos syntyy, miksi aine voi olla suprajohtava tai miten laservaloa saadaan aikaiseksi.

Tässä luvussa opiskellaan, millaisilla malleilla atomia kuvataan sekä miten säteilyn emittoituminen aineesta ja absorboituminen aineeseen tapahtuu.

3.1 Varhaiset atomimallit

Thomsonin atomimalli

Vuonna 1897 englantilainen fyysikko Sir Joseph John Thomson löysi negatiivisesti varatun hiukkasen, jolle hän antoi nimen **elektroni**. Hän päätteli, että näitä hiukkasia on kaikkien alkuaineiden atomeissa. Hän esitti vuonna 1904 ensimmäisen atomin sisäistä rakennetta kuvaavan mallin.

▲ Ilotulitteiden eriväriset valot ovat peräisin atomien elektronien energiamuutoksista. Strontiumin yhdisteet tuottavat punaisen värin, kupariyhdisteet sinisen ja natriumin keltaisen.

Historiajana

400 eKr.

Noin 400 eKr. kreikkalainen Demokritos esitti ajatuksen, että aine koostuu pienistä jakamattomista osista, atomeista.

1800

Englantilainen John Dalton (1766–1844) esitti vuonna 1804 kokeellisten havaintojen perusteella, että tietty kemiallinen yhdiste koostuu aina samoista alkuaineista. Alkuaineet ovat jakaantuneet tässä yhdisteessä niin, että niiden massojen suhde on aina sama. Dalton päätteli, että jokainen alkuaine koostuu atomeista, jotka ovat jakamattomia.

1900

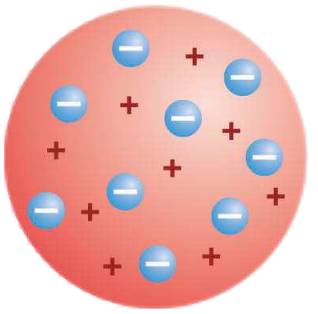
Englantilainen Joseph John Thomson (1856–1940) löysi elektronin vuonna 1897. Vuonna 1904 hän esitti ensimmäisen atomin rakennetta kuvaavan atomimallin.

Uusiseelantilainen Ernest Rutherford (1871–1937) löysi atomin ytimen vuonna 1911. Hänen tutkijaryhmänsä teki koesarjan, jossa pommitettiin α- hiukkasilla ohutta kultakalvoa.

Tanskalainen Niels Bohr (1885–1962) yhdisti Rutherfordin sirontakokeiden tulokset ja Planckin idean energian kvantittumisesta. Hän esitti vuonna 1913 vetyatomin mallin.

Englantilainen James Chadwick (1891–1974) osoitti vuonna 1920, että atomin ytimen varaus on Ze, missä *Z* on alkuaineen järjestysluku ja e alkeisvaraus.

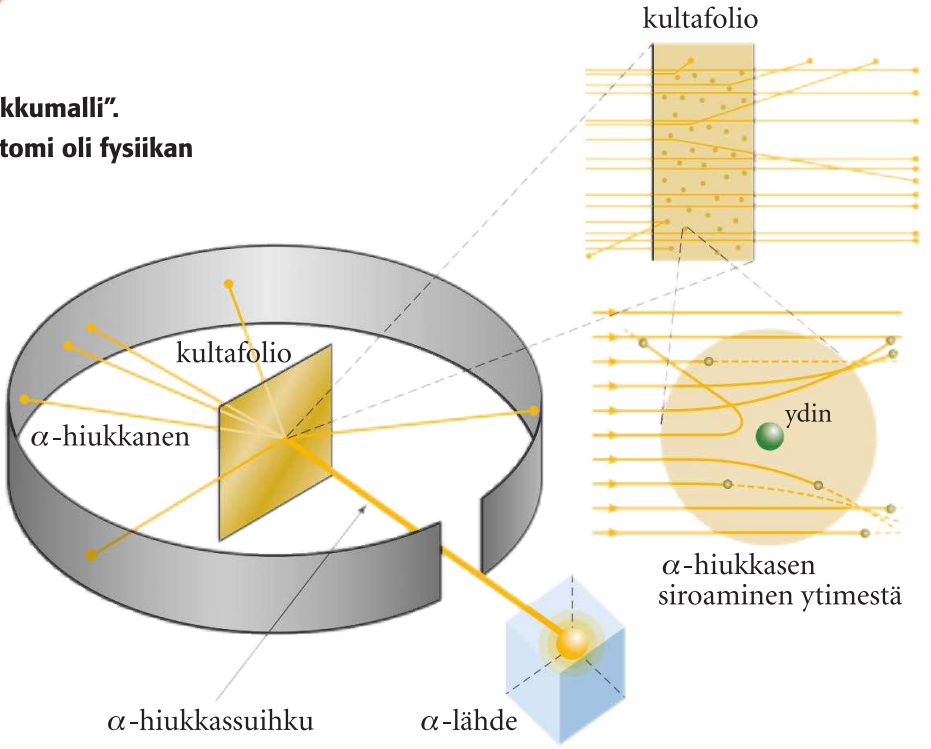
Thomsonin mallin mukaan atomit muodostuvat homogeenisesta, positiivisesti varautuneesta hyytelömäisestä aineesta, jonka sisällä negatiiviset elektronit ovat kuin rusinat kakussa. Hän päätteli, että atomien täytyy olla ulospäin sähköisesti neutraaleja, koska atomeista muodostuvat kappaleet ovat sähköisesti neutraaleja.



▲ **Thompsonin atomimalli, "rusinakakkumalli". Thompsonin atomimallin mukainen atomi oli fysiikan klassisen teorian mukaan pysyvä.**

Rutherfordin koe ja atomimalli

Ernest Rutherford ja tutkijaryhmä teki koesarjan, jossa he pommittivat radioaktiivisesta aineesta lähtevillä alfahiukkasilla ohutta kultakalvoa. Suurin osa alfahiukkasista kulki kultakalvon läpi suuntaansa muuttamatta tai niiden suunta muuttui vain vähän, niin kuin kalvo olisi tyhjää täynnä. Tutkijoiden hämmästykseksi muutama alfahiukkanen kimposi kuitenkin takaisin tulosuuntaansa.



▶ **Rutherfordin kokeessa alfasäteilylähteenä käytettiin radiumnäytettä. Hiukkassuihku kohdistettiin erittäin ohueen kultafolioon. Suurin osa alfahiukkasista kulki kultafolion läpi suuntaansa muuttamatta, muutamien hiukkasten suunta muuttui vähän ja jokin alfahiukkanen kimposi takaisin tulosuuntaansa. Sironneet alfahiukkaset jättävät jäljen filmille, joka on asetettu kuvan mukaisesti kultafolion ympärille.**

2000

Saksalainen Werner Heisenberg (1901–1976) esitti vuonna 1925 atomin matemaattisen mallin, jossa tulokset voitiin laskea matriisien avulla. Vuonna 1927 hän esitti, että atomaaristen hiukkasten dualistinen luonne rajoittaa hiukkasista saatavan tiedon tarkkuutta.

Itävaltalainen Erwin Schrödinger (1887–1961) esitti vuonna 1926 aaltomekaanisen atomimallin, jonka mukaan elektronin tilaa voidaan kuvata aaltofunktiolla.

Itävaltalainen Wolfgang Pauli (1900–1958) esitti vuonna 1925 Paulin kieltosääntönä tunnetun periaatteen, jonka mukaan atomissa ei voi olla kahta identtistä elektronia.

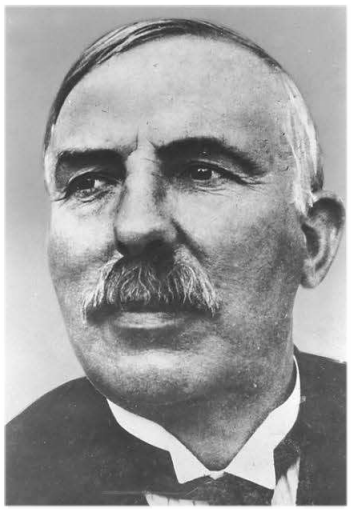
Englantilainen Paul Dirac (1902–1984) yhdisti Heisenbergin ja Schrödingerin tulokset ja kehitti elektronin kvanttiteorian.

Yhdysvaltalainen Richard Feynman (1918–1988) kehitti säteilyn ja aineen vuorovaikutuksen teoriaa eli kvanttielektrodynamiikkaa.

Vuoden 1997 fysiikan Nobel-palkinnon sai kolme laserfysiikan tutkijaa: amerikkalainen Steven Chu, ranskalainen Claude Cohen-Tannoudji ja amerikkalainen William Phillip. He kehittivät menetelmiä, joiden avulla atomeja voidaan jäähdyttää ja vangita laservalon avulla.

Vuoden 1998 fysiikan ja kemian Nobel-palkinnot myönnettiin kvanttimekaniikan tutkijoille. Fysiikan palkinnon saivat amerikkalaiset Robert Laughlin, Horst Störmer ja Daniel Tsui uudentyyppisen kvanttinesteen löytämisestä. Hyvin voimakkaissa magneettikentissä ja alhaisissa lämpötiloissa kvanttineste käyttäytyy niin kuin siinä olisi murtolukuisia varauksia. Kemian palkinnon saivat amerikkalaiset Walter Kohn ja John Pople. He kehittivät molekyylien elektronirakenteen laskemiseen tarvittavia menetelmiä ja loivat näiden menetelmien perustana olevia teorioita.

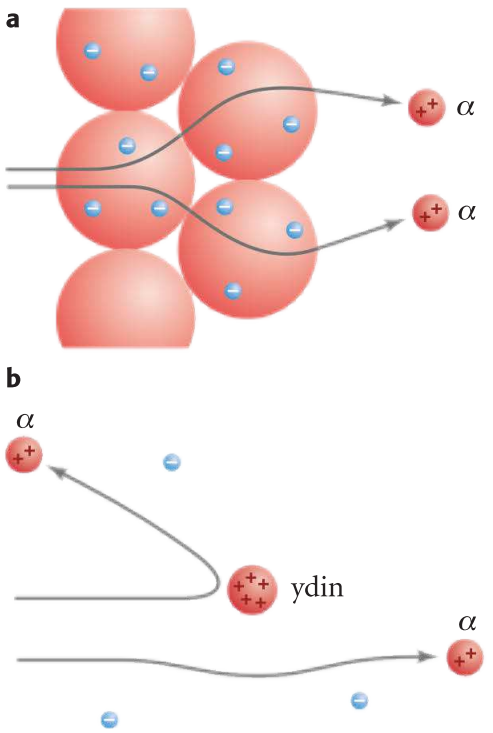
Japanilainen Shuji Nakamura sai suomalaisen Millenium-teknologiapalkinnon sinisen ja valkoisen LED-valon kehittämisestä vuonna 2006.



Ernest Rutherford kertoi myöhemmin, että alfahiukkasen täydellinen suunnanmuutos oli "uskomattominta, mitä hänelle oli koskaan tapahtunut. – Se oli melkein yhtä uskomatonta kuin, että pommitettaessa silkkipaperia 15 tuuman ammuksella se singahtaa takaisin kohti ampujaa."

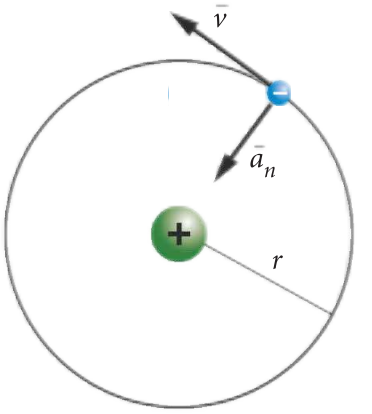
Ne α-hiukkaset, jotka kulkivat etäältä kultaytimistä, etenivät lähes suoraan, koska sähköinen vuorovaikutus ytimen ja α -hiukkasen välillä oli heikko. Lähelle ydintä osuneet α -hiukkaset vuorovaikuttivat ytimen kanssa ja niiden rata kaartui. Suoraan ytimeen osuneet α -hiukkaset kimposivat sähköisen voiman vaikutuksesta takaisin.

Kokeessa tehdyt havainnot olivat ristiriidassa Thomsonin mallin kanssa. Havaintojen perusteella Rutherford päätteli, että lähes koko atomin massa on keskittynyt pieneen **ytimeen**. Ytimen ympärillä on elektroniverho, joka määrää atomin koon.



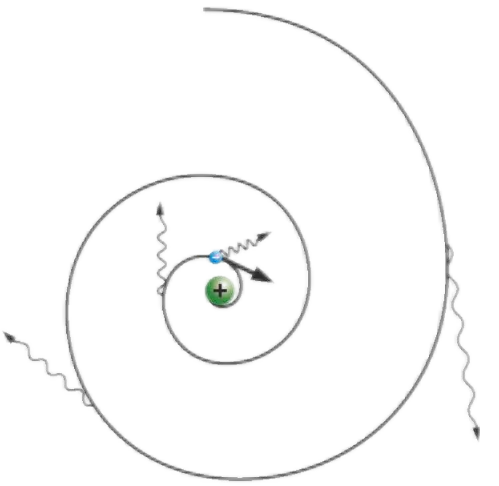
Kuva esittää, miten α -hiukkaset olisivat läpäisseet a) Thomsonin mallin mukaisen atomin ja b) Rutherfordin mallin mukaisen atomin. Jos kuva piirrettäisiin oikeassa mittakaavassa, Rutherfordin mallissa elektronit olisivat tuhansia kertoja kauempana ytimestä.

Rutherford pystyi selittämään havainnot vuonna 1911 atomimallilla, jossa positiivisesti varattua ydintä kiersivät negatiivisesti varautuneet elektronit.



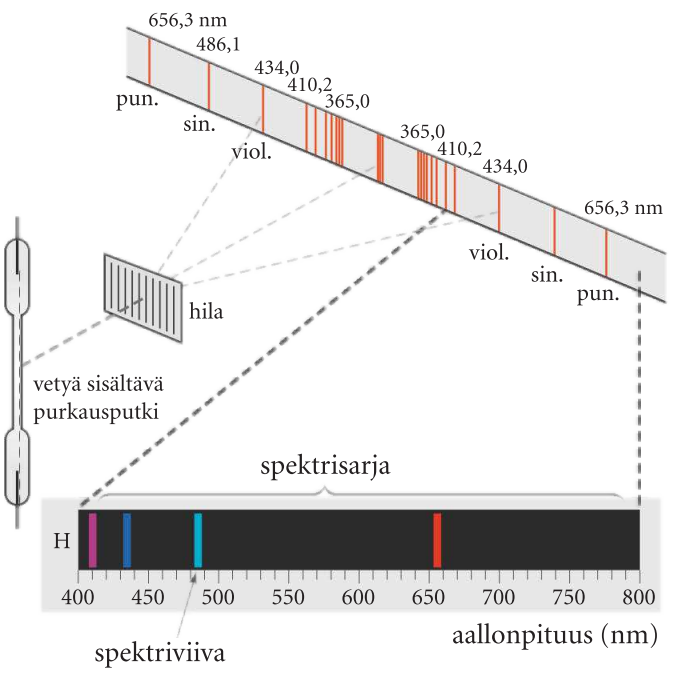
Rutherfordin atomin "aurinkokuntamalli". Elektronit pysyvät ympyräradalla Coulombin lain mukaisen vetovoiman johdosta. Kuvaan on piirretty ydintä kiertävän elektronin hetkellinen nopeus ja normaalikiihtyvyys.

Vaikka Rutherfordin malli pystyi selittämään sirontakokeen havainnot, mallin mukainen atomi ei kuitenkaan olisi ollut pysyvä, koska ympyräradalla elektroni olisi kiihtyvässä liikkeessä ja se säteilisi energiaa ja syöksyisi lopulta ytimeen.



Ydintä kiertävä elektroni on kiihtyvässä liikkeessä, koska sen liikesuunta muuttuu jatkuvasti. Sähkömagnetismin teorian mukaan elektronin pitäisi silloin säteillä. Sen vuoksi elektroni menettäisi nopeasti energiaa ja putoaisi atomin ytimeen. Atomi ei olisi pysyvä.

Vedyn spektri



▲ Vedyn spektriviivat saadaan näkyviin hajottamalla lampun lähettämä sähkömagneettinen säteily hilalla spektriksi. Vetyatomilla on alkuaineista yksinkertaisin viivaspektri. Siinä on näkyvän valon alueella neljä spektriviivaa, joiden aallonpituudet ovat 410 nm (violetti), 434 nm (sinivioletti), 486 nm (sinivihreä) ja 656 nm (punainen). Vedyn näkyvän valon spektrisarjaa kutsutaan löytäjänsä mukaan Balmerin sarjaksi.

Hehkuvan atomaarisen vetykaasun lähettämän sähkömagneettisen säteilyn viivaspektrin viivat muodostavat sarjoja. Yllä olevassa kuvassa on esitetty vedyn näkyvän valon spektrisarja. 1800-luvun lopulla löydettiin yhtälö, joka kuvasi atomaarisen vedyn spektriviivojen paikat toistensa suhteen.

Vetyatomin spektriviivat

Vetyatomin spektriviivojen aallonpituudet voidaan laskea yhtälöstä

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

jossa

$$R_{\mathrm{H}} = 1{,}0974 \cdot 10^7 \,\frac{1}{\mathrm{m}}$$

on Rydbergin vakio vedylle ja

$n = 1,2,3,...$

$m = n+1, n+2,...$

Kun edellisessä yhtälössä kokonaisluku n on vakio, ja kokonaisluku m saa arvoja $n+1$, $n+2$, $n+3$, …, saadaan aallonpituudet, jotka muodostavat **spektriviivasarjan** eli **spektrisarjan**. Sarjat on nimetty löytäjiensä mukaan. Viereisessä kuvassa näkyvän valon spektriviivat muodostavat Balmerin sarjan.

n	Spektriviivojen sarjan nimi	Aallonpituusalue
1	Lymannin sarja	ultraviolettisäteily
2	Balmerin sarja	näkyvä valo
3	Paschenin sarja	infrapunasäteily
4	Bracketin sarja	infrapunasäteily
5	Pfundin sarja	infrapunasäteily

Spektriviivojen aallonpituuden yhtälö oli kokeellinen, eikä sille ollut mitään teoreettista perustaa. Spektriviivojen esiintyminen sarjoina ja sarjojen kytkeytyminen toisiinsa yksinkertaisen yhtälön avulla antoivat kuitenkin viitteitä siitä, että vetyatomin säteilemää ja absorboimaa sähkömagneettista säteilyä säätelee jokin selkeä ja yleispätevä mekanismi. Tätä ei kuitenkaan kyetty kehittämään 1800-luvun lopulla klassisen fysiikan pohjalta.

Esimerkki 1

Vetyatomin spektriviivojen aallonpituusyhtälössä $\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2})$ valitaan kokonaisluvun n arvoksi 2.

a) Mitä arvoja kokonaisluku m voi tällöin saada?
b) Mikä tämän spektrisarjan nimi on?
c) Laske tämän spektrisarjan suurin ja pienin aallonpituus.

Ratkaisu

a) Kokonaisluku $n = 2$. Silloin kokonaisluvun m arvot ovat $m = n + 1, n + 2, \ldots$

n	$n+1, n+2, n+3, \ldots$	m
2	2 + 1	3
2	2 + 2	4
2	2 + 3	5
2	2 + 4	6
2	2 + 5	7
	...	
2	$2 + \infty$	∞

b) Kokonaislukua $n = 2$ vastaavan spektrisarjan nimi on Balmerin sarja.

c) Aallonpituus on sitä suurempi, mitä lähempänä kokonaislukujen n ja m arvot ovat toisiaan. Tällöin myös $\frac{1}{n^2}$ ja $\frac{1}{m^2}$ ovat lähinpinä toisiaan ja erotus $\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}$ on pienin. Kun $n = 2$ ja $m = 3$, saadaan Balmerin sarjan suurin aallonpituus.

Balmerin sarjan pienin aallonpituus saadaan, kun n ja m:n arvot poikkeavat toisistaan mahdollisimman paljon. Tällöin $\frac{1}{n^2}$ ja $\frac{1}{m^2}$ poikkeavat mahdollisimman paljon toisistaan, jolloin $\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}$ on suurin. Siten $n = 2$ ja $m = \infty$.

Lasketaan Balmerin sarjan suurin aallonpituus

$$\frac{1}{\lambda_{max}} = R_H(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2})$$
$$= 1{,}0974 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}} \cdot (\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2})$$
$$= 1524166{,}667 \frac{1}{\text{m}}$$

eli

$$\lambda_{max} = 656{,}1 \text{ nm}.$$

Balmerin sarjan pienin aallonpituus saadaan, kun $m \to \infty$.

$$\frac{1}{\lambda_{min}} = R_H(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2})$$
$$\to 1{,}0974 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}} \cdot (\frac{1}{2^2} - 0)$$
$$\frac{1}{\lambda_{min}} = 2743500{,}000 \frac{1}{\text{m}}$$

eli

$$\lambda_{min} = 364{,}5 \text{ nm}.$$

Vastaus

a) Kokonaisluku m saa arvoja $3, 4, 5, 6, 7, \ldots, \infty$.
b) Spektrisarjan nimi on Balmerin sarja.
c) Spektrisarjan suurin aallonpituus on 656,1 nm ja pienin aallonpituus 364,5 nm.

Huom.

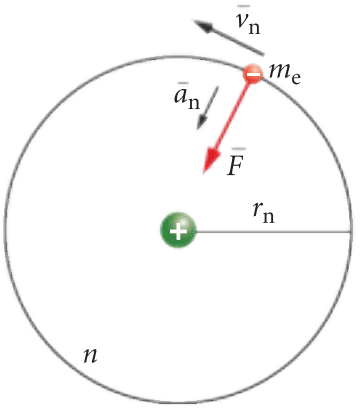
Spektrisarjan kokonaislukuja $n = 2$ ja $m = 3$ vastaava 656,1 nm:n punainen viiva näkyy sivun 47 spektrissä. Pienin aallonpituus ei ole näkyvän valon alueella.

Bohrin vetyatomimalli

Atomin spektriviivat johtivat Rutherfordin oppilaan Niels Bohrin pohtimaan ajatusta, että atomi pystyy emittoimaan ja absorboimaan energiaa vain tietynsuuruisina kvantteina. Bohr yhdisti ensimmäisenä Rutherfordin sirontakokeen tulokset ja Planckin idean kvantittumisesta ja esitti vuonna 1913 mallin vetyatomille.

Tekemällä viisi oletusta Bohr pystyi tämän mallin avulla selittämään sekä Rutherfordin havainnot että tiedot vetyatomin spektristä. **Bohrin vetyatomimallissa elektroni on ”puhdas” hiukkanen.** Kolme ensimmäistä oletusta ovat klassisen mekaniikan mukaisia.

1. **Vetyatomin elektroni kiertää ympyrärataa positiivisesti varatun ytimen ympärillä.**



2. **Elektroni pysyy radallaan Coulombin lain mukaisen ytimen ja elektronin välisen vetovoiman $F_s = k\frac{Q_e Q_e}{r^2}$ johdosta.**

3. **Elektronin rata voidaan määrittää klassisen mekaniikan mukaisesti elektronin liikeyhtälöstä $\sum \bar{F} = m\bar{a}_n$, joka on nyt $k\frac{Q_e^2}{r_n^2} = m_e\frac{v_n^2}{r_n}$.**

Koska ympyräradalla kiertävä elektroni on kiihtyvässä liikkeessä, se säteilisi energiaa ja atomi tuhoutuisi, joten Bohr teki oletuksen pysyvistä radoista.

4. **Tietyt elektronin radat ovat pysyviä, jolloin atomi on stationäärisessä eli pysyvässä tilassa. Stationäärisessä tilassa atomi ei säteile energiaa, joten sen energia pysyy vakiona.**

Spektriviivahavainnot Bohr selitti niin, että elektroni voi siirtyä radalta toiselle.

5. **Kun atomi siirtyy stationäärisestä tilasta toiseen, atomi absorboi tai emittoi energiakvantin. Tällöin elektroni siirtyy radalta toiselle.**

Elektronin siirtyminen radalta toiselle havaitaan muun muassa viivana vetyatomin spektrissä.

Säteilykvantit, joiden energia on

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda},$$

muodostavat tietyn viivan spektrissä. Sijoitetaan tähän vetyatomin spektriviivojen aallonpituudet yhdistävä yhtälö

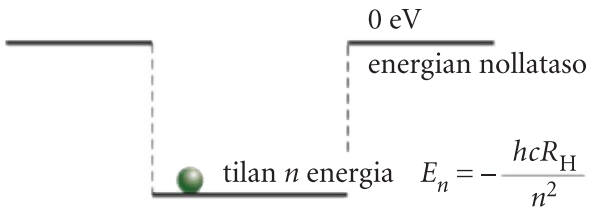
$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Tällöin säteilykvantin energia on

$$E = hcR_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) = \frac{hcR_H}{n^2} - \frac{hcR_H}{m^2}.$$

Koska yhtälön vasten puoli $E = hf$ esittää säteilykvantin energiaa, niin myös oikean puolen termit kuvaavat energiaa. Termit voidaan tulkita **atomin kahden eri tilan** n:n ja m:n energioiksi.

On sovittu, että kaukana ytimestä olevan elektronin potentiaalienergia on nolla, jolloin ytimen lähellä potentiaalienergia on negatiivinen. Myös ytimen sähkökentän energia on negatiivinen. Tästä seuraa, että tilan n energia on negatiivinen.



▲ **Ytimen sähkökentän sitoma elektroni on ikään kuin kuopassa. Energian nollataso on kuopan reunalla, ja kuopan pohjalla elektronin energia on negatiivinen. Elektroni nousee pois kuopasta, jos se saa energiaa riittävästi.**

Vetyatomin energiatilat

Vetyatomin pysyvien tilojen, eli stationäärisen tilojen, energiat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2},$$

jossa

h on Planckin vakio
c on valon nopeus
R_H on Rydbergin vakio vedylle
n on kokonaisluku 1, 2, 3, 4, …

Vetyatomin kahden tilan energioiden erotus ΔE on siten

$$\Delta E = -(-\frac{hcR_H}{n^2}) - \frac{hcR_H}{m^2}$$
$$= -\frac{hcR_H}{m^2} - (-\frac{hcR_H}{n^2}),$$

joka voidaan kirjoittaa muodossa

$$\Delta E = E_m - E_n.$$

Koska n saa vain kokonaislukuarvoja 1, 2, 3, … ja m kokonaislukuarvoja $n+1$, $n+2$, $n+3$, …, **vetyatomin energiatilojen energiat eivät voi olla jatkuvia.** Ne eivät voi saada mitä tahansa arvoja.

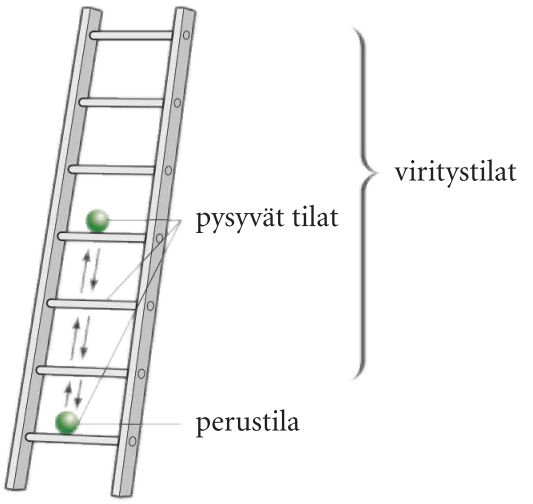
Kun lausekkeeseen sijoitetaan vakiot, vetyatomin pysyvien tilojen energiat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2}$$
$$= -\frac{4{,}13567 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot 2{,}99792 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1{,}09737 \cdot 10^{7}\,\frac{1}{\text{m}}}{n^2}$$
$$\approx -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{n^2}.$$

Kokonaislukua $n = 1, 2, 3, \ldots$ kutsutaan **kvanttiluvuksi. Vetyatomin energiatilat ovat kvantittuneet.**

Perustila ja viritystilat

Vetyatomi on perustilassa silloin, kun sen energia on pienin mahdollinen, eli kun $n = 1$. Muita tiloja kutsutaan viritystiloiksi.



◀ **Bohrin atomimallin mukaan elektroni voi sijaita vain tietyissä tarkkaan määrätyissä energiatiloissa vastaavalla tavalla kuin tikkaille voidaan sijoittaa jalka vain poikkipuille. Energiatilat eivät sijaitse atomissa tasavälein.**

Bohrin atomimalli selitti vetyatomin energiatilojen kvantittumisen ja oli siten perusta kehittyneemmille atomimalleille. Bohrin atomimallin heikkoudet ovat, että malli

- toimii vain yksielektroniselle atomille
- ei selitä stationäärisyysehtoa fysikaalisesti
- ei selitä spektriviivojen intensiteettejä
- ei ota huomioon suhteellisuusteoriaa.

Esimerkki 2

a) Kuinka suuri vetyatomin perustilan energia on?
b) Kuinka suuri vetyatomin ensimmäisen viritystilan energia on?
c) Kuinka suuri näiden tilojen energioiden erotus on?

Ratkaisu

Vetyatomin energiatilat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{hcR_\mathrm{h}}{n^2} = -\frac{13{,}6\,\mathrm{eV}}{n^2}.$$

a) Vetyatomin perustilan energia saadaan kokonaisluvun arvolla $n = 1$

$$E_1 = -\frac{13{,}6\,\mathrm{eV}}{1^2} = -13{,}6\,\mathrm{eV}.$$

b) Vetyatomi on ensimmäisessä viritystilassa, kun $n = 2$. Ensimmäisen viritystilan energia on $E_2 = -\frac{13{,}6\,\mathrm{eV}}{2^2} = -3{,}39\,\mathrm{eV}$.

c) Tilojen energioiden erotus on

$$\Delta E = E_2 - E_1. = -3{,}39\,\mathrm{eV} - (-13{,}6\,\mathrm{eV}) = 10{,}21\,\mathrm{eV} \approx 10{,}2\,\mathrm{eV}.$$

Vastaus

a) Vedyn perustilan energia on –13,6 eV.
b) Vedyn ensimmäisen viritystilan energia on –3,39 eV.
c) Perustilan ja ensimmäisen viritystilan energiaero on 10,2 eV.

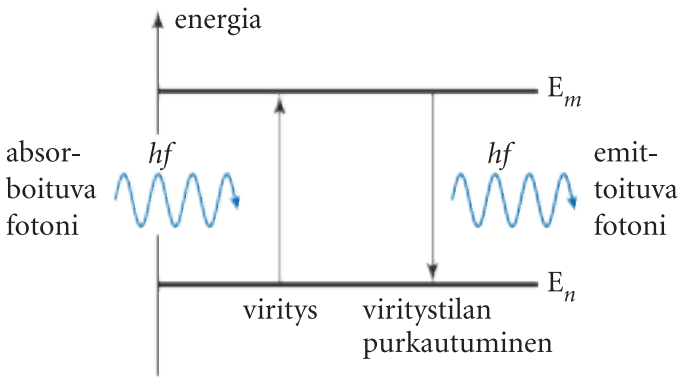
▲ Tanskalainen Nils Bohr (1885–1962) yhdisti Rutherfordin sirontakokeiden tulokset ja Planckin idean energian kvantittumisesta. Vuonna 1913 Bohr esitti mallin vetyatomille.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

3.2 Energiatasokaavio, virittyminen ja purkautuminen

Bohrin mallilla voidaan selittää vetyatomin spektriviivojen syntyminen atomin energiatilojen avulla. Elektroni voi siirtyä tietystä energiatilasta ylempään, jos **atomi absorboi fotonin**, jonka energia on tarkalleen kyseisten energiatilojen energioiden erotus $\Delta E = hf$. Jos fotonin energia ei vastaa mitään siirtymää ja jos energia ei riitä ionisaatioon, atomi ei absorboi fotonia.

Jos elektroni siirtyy ylemmästä energiatilasta alempaan, **atomi emittoi fotonin**, jonka energia on tarkalleen kyseisten energiatilojen energioiden erotus.



▲ **Atomin virittyminen ja viritystilan purkautuminen.**

Virittyminen

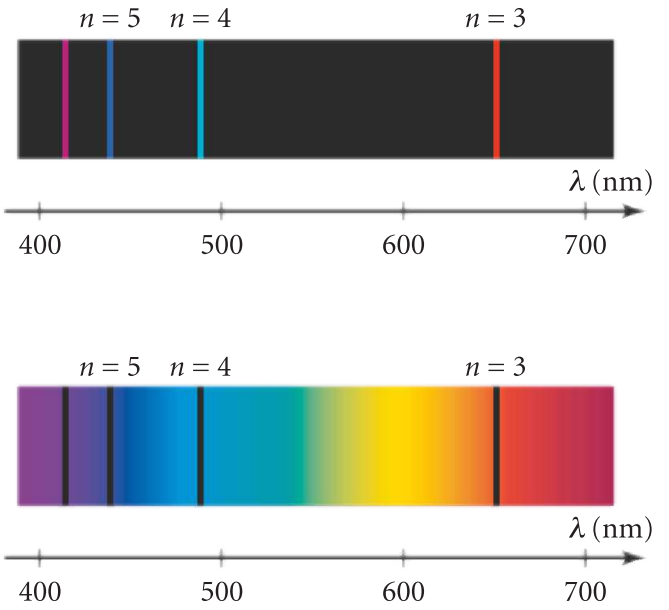
Kun elektroni siirtyy alemmasta energiatilasta korkeampaan, sanotaan, että atomi **virittyy**. Atomi absorboi fotonin, jonka energia on siirtymää vastaavien energiatilojen energioiden erotus.

Viritystilan purkautuminen

Elektroni ”putoaa” korkeammasta energiatilasta alempaan. Atomi emittoi fotonin, jonka energia on siirtymää vastaavien energiatilojen energioiden erotus.

Kun atomi absorboi fotonin, atomin elektroni saa fotonin energian kokonaan ja fotoni lakkaa olemasta.

Atomin emissiospektrin kirkkaat viivat ja mahdolliset absorptiospektrin mustat viivat ovat spektrissä kohdakkain. Niiden aallonpituudet ovat samat.



◀ **Vedyn emissio- ja absorptiospektrissä spektriviivat ovat kohdakkain, koska ne syntyvät elektronin siirtyessä samojen energiatilojen välillä.**

Edellä todettiin, että vetyatomin mahdolliset energiatilat saadaan yhtälöstä

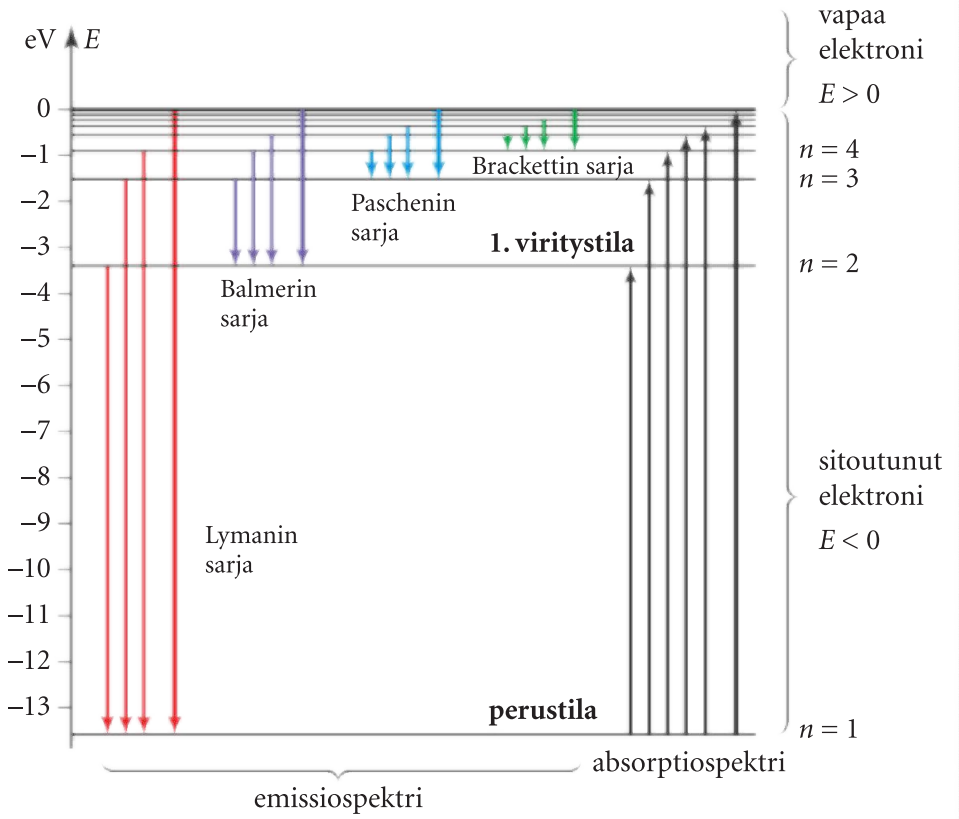
$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2} = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{n^2},$$

joten kuusi ensimmäistä energiatilaa ovat

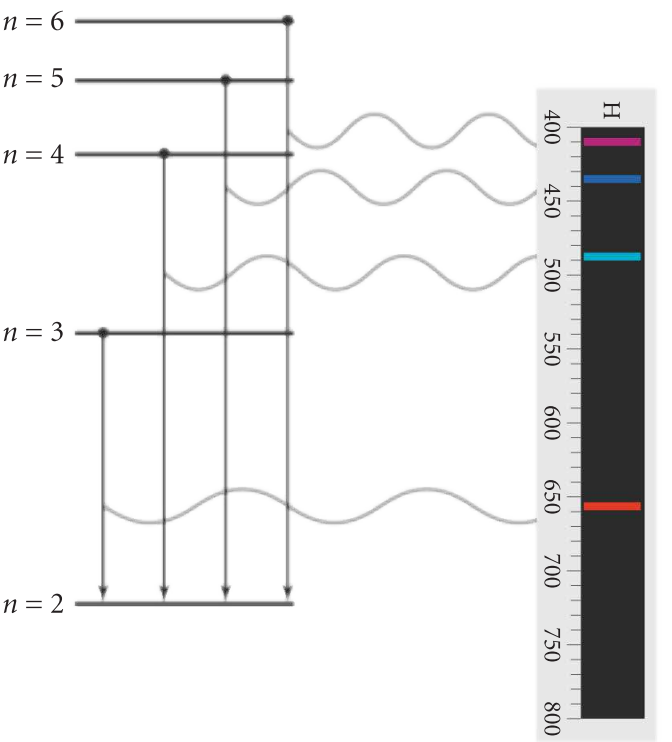
Tila	n	E_n	Energia
perustila	1	E_1	–13,6 eV
1. viritystila	2	E_2	–3,39 eV
2. viritystila	3	E_3	–1,51 eV
3. viritystila	4	E_4	–0,85 eV
4. viritystila	5	E_5	–0,54 eV
5. viritystila	6	E_6	–0,38 eV

Piirretään taulukon perusteella **vetyatomin energiatasokaavio**. Kun atomaarinen vety on riittävän korkeassa lämpötilassa, kaikki kaavioon merkityt siirtymät voivat tapahtua. Siirtymät on koottu kuvioon spektrisarjoittain.

Vetyatomin energiatasot ja spektrisarjat



▲ **Atomi absorboi fotonin yleensä perustilassa, koska viritystilojen elinaika on lyhyt. On erittäin epätodennäköistä, että virittynyt atomi ehtii absorboida fotonin.**



▲ **Bohr pystyi selittämään energiatilojen avulla vedyn näkyvän valon alueen neljä spektriviivaa, jotka Balmer löysi.**

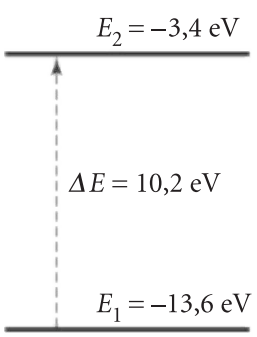
Esimerkki 1

Fotoni vuorovaikuttaa perustilassa olevan vetyatomin kanssa. Päättele energiatasokaavion avulla, mitä vetyatomille tapahtuu, kun fotonin energia on

a) 3,7 eV
b) 10,2 eV
c) 10,7 eV
d) 14,7 eV.

Ratkaisu

Vetyatomi on perustilassa, eli vetyatomin elektroni on alimmalla energiatasolla. Elektronin siirtyminen ensimmäiselle viritystilalle vaatii energiaa



$$\begin{aligned}\Delta E &= E_2 - E_1 \\ &= -3{,}4\,\text{eV} - (-13{,}6\,\text{eV}) \\ &= 10{,}2\,\text{eV}.\end{aligned}$$

a) Fotoni, jonka energia on 3,7 eV, ei pysty virittämään vetyatomia. Fotoni ei absorboidu atomiin.

b) Fotoni, jonka energia on 10,2 eV, pystyy virittämään vetyatomin. Elektroni siirtyy ensimmäiseen viritystilaan. Fotonin energia absorboituu atomiin ja fotoni lakkaa olemasta.

c) Fotoni, jonka energia on 10,7 eV, ei pysty virittämään vetyatomia, koska fotonin energia ei vastaa tarkalleen energiatasojen energioiden erotusta. Fotoni ei absorboidu atomiin.

d) Fotoni, jonka energia on 14,7 eV, pystyy ionisoimaan vetyatomin. Fotonin energiasta 13,6 eV absorboituu atomiin ja loput 1,1 eV jää elektronin liike-energiaksi.

Vastaus

a) Vetyatomi ei virity.
b) Vetyatomi virittyy ensimmäiseen viritystilaan.
c) Vetyatomi ei virity.
d) Vetyatomi ionisoituu.

Esimerkki 2

Vetyatomi siirtyy viritystilasta $n = 3$ perustilaan.

a) Esitä tapahtuma energiatasokaavion avulla.

b) Laske syntyvän säteilyn aallonpituus.

Ratkaisu

a) Vetyatomin energiatilat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2} = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{n^2}.$$

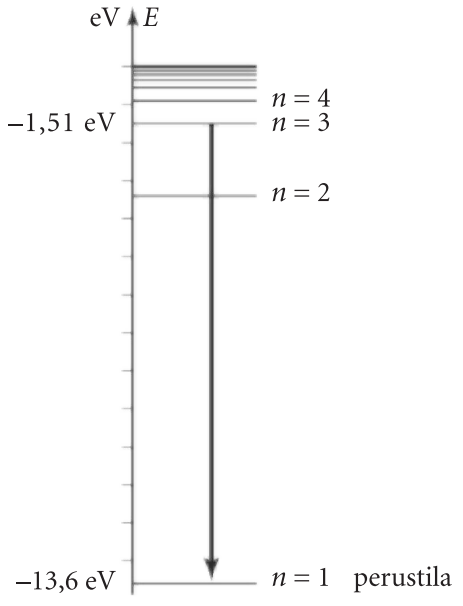
Perustilan ($n = 1$) energia on

$$E_1 = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{1^2} = -13{,}6\,\text{eV},$$

ja toisen viritystilan ($n = 3$) energia on

$$E_3 = -\frac{13{,}6\,\text{eV}}{3^2} = -1{,}51\,\text{eV}.$$

Piirretään osa vedyn energiatasokaaviosta ja siihen kysytty siirtymä.



b) Lasketaan energiatilojen erotus

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_3 - E_1 \\ &= -1{,}51\,\text{eV} - (-13{,}6\,\text{eV}) \\ &= 12{,}09\,\text{eV}.\end{aligned}$$

Koska kvantin energia on

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

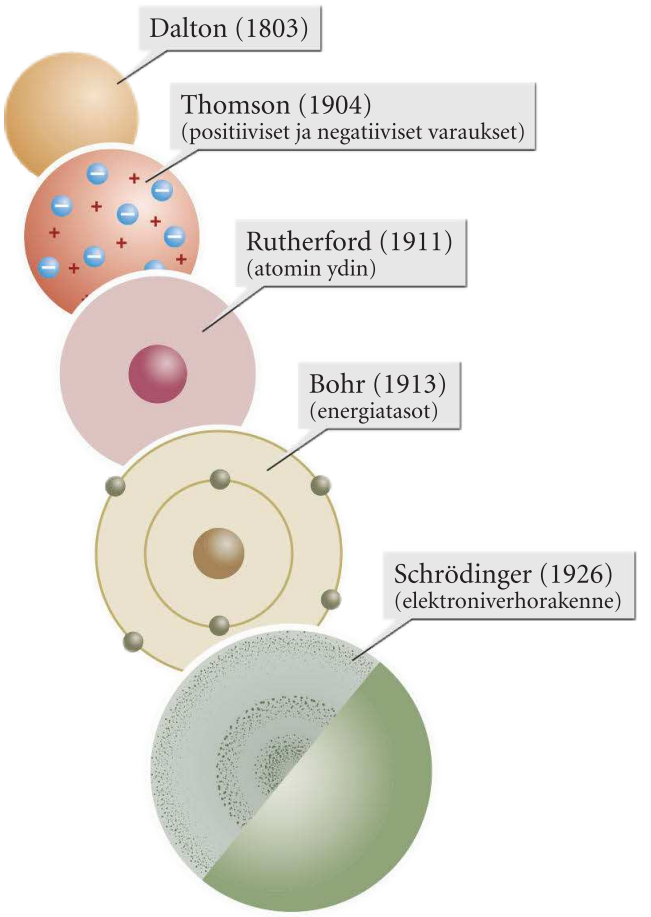
saadaan aallonpituudeksi

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{hc}{\Delta E} \\ &= \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{12{,}09\,\text{eV}} \\ &= 1{,}0256 \cdot 10^{-7}\,\text{m} \approx 102{,}6\,\text{nm}.\end{aligned}$$

Vastaus

b) Säteilyn aallonpituus on 102,6 nm.

Kvanttimekaaninen atomimalli



▲ **Eri vaiheissa atomin rakenteelle on ollut erilaisia malleja. Nykyistä mallia kutsutaan kvanttimekaaniseksi atomimalliksi.**

Vaikka Bohrin atomimalli selittää vain vetyatomin, se paljasti atomin ominaisuuksia kuvaavien suureiden kvantittumisen. Bohrin vetyatomin mallin sisältämä ajatus energiatiloista pätee myös monielektronisiin atomeihin ja molekyyleihin. Bohrin mallia seurasi **kvanttimekaaninen atomimalli**, jossa **elektronin tilaa kuvataan neljällä kvanttiluvulla**. Nykyisen käsityksen mukaan tämä malli kuvaa atomia parhaalla mahdollisella tavalla.

Elektronin kvanttiluvut

Kvanttiluku	Tunnus	Mahdolliset arvot
pääkvanttiluku	n	1, 2, 3,…
sivukvanttiluku	l	0, 1, 2, …, n-1
magneettinen kvanttiluku	m_l	0, ±1, ±2, …, ±l
spinkvanttiluku	m_s	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\Psi=0$$

▲ **Erwin Schröninger esitti vuonna 1926 kvanttimekaanisen atomimallin, jossa elektronin tarkat kiertoradat korvataan todennäköisyysjakaumilla. Schrödingerin yhtälöstä sanotaan, että se selittää kaiken kemiasta ja paljon fysiikasta.**

Kvanttimekaanisen atomimallin kolme ensimmäistä kvanttilukua liittyvät niin sanotun Schrödingerin yhtälön ratkaisuihin eli tilafunktioihin. Kvanttimekaanisessa mallissa tilafunktio korvaa Bohrin mallissa ympyräliikkeessä olevan elektronin tilaa kuvaavat suureet.

Tilafunktio ilmaisee atomissa olevan elektronin kvanttimekaanisen tilan. Samalla tavalla mekaniikassa nopeus ja kiihtyvyys ilmaisevat kappaleen liiketilan, ja lämpöopissa lämpötila, paine ja tiheys ilmaisevat kaasun termodynaamisen tilan.

Yksielektronisessa vetyatomissa elektronin energia riippuu vain pääkvanttiluvusta n, koska elektroni on vuorovaikutuksessa vain ytimessä olevan protonin kanssa. Jos atomissa on useampia elektroneja, niiden energiaan vaikuttaa myös vuorovaikutus muiden elektronien kanssa. Näissä atomeissa elektronin energia riippuu sekä pääkvanttiluvusta n että sivukvanttiluvusta l, joten nämä kaksi kvanttilukua määräävät elektronin energiatilan.

Kvanttimekaanisen atomimallin antama kuva atomista on ratkaisevasti erilainen kuin Bohrin atomimallin antama kuva. Kun Bohrin mallissa elektronit kiertävät atomin ydintä pitkin ympyräratoja, kvanttimekaanisen atomimallin mukaan elektronit eivät ole ytimen kiertolaisia.

Tilafunktioon liittyvät kolme kvanttilukua (n, l, m_l) määrittelevät atomin **elektroniorbitaalin**. Orbitaalia kuvaavan tilafunktion perus-

tella voidaan selvittää alue, jossa elektroni todennäköisimmin on. Yhdellä orbitaalilla voi olla kaksi elektronia, joilla on eri spinkvanttiluvun m_s arvo. Tällöin elektronit ovat eri tilassa.

Paulin kieltosääntö

Jokaisella saman atomin elektronilla on erilainen neljän kvanttiluvun yhdistelmä, eli ne ovat eri tiloissa.

Atomin kuorimalli selittää alkuaineiden kemialliset ominaisuudet

Bohrin atomimallin mukaiset ennusteet vastaavat havaintoja vetyatomin tapauksessa, mutta monielektronisten atomien ominaisuuksia se ei pysty selittämään. Kvanttimekaanista mallia voidaan käyttää muidenkin atomien kuin vetyatomin kuvaamiseen. Kvanttimekaaninen malli on ensisijaisesti atomin matemaattinen kuvaus, eikä kvanttimekaanisen mallin atomia voi oikeastaan esittää kuvana.

Koska kvanttimekaanisen mallin mukaista atomia on vaikea hahmottaa, energiatilojen sijasta käytetään usein mallia, jossa puhutaan atomin elektronikuorista. Mallia sanotaan **atomin kuorimalliksi**. Kuorimallissa elektronien energiatilat määräytyvät kvanttimekaanisen mallin antamien kvanttilukujen perusteella, mutta siinä energiatiloja kuvataan samankeskisinä pallokuorina.

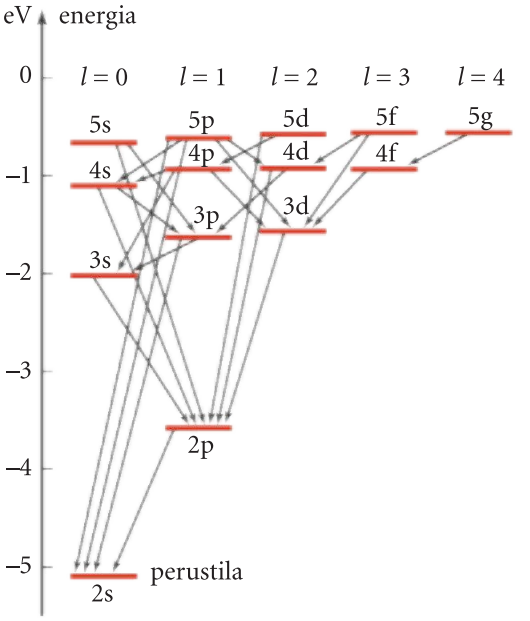
Kuorimallissa pääkvanttiluku n ilmaisee pääkuoren. Pääkuorten tunnuksina käytetään yleensä kvanttiluvun arvoja 1, 2, 3, 4… . Joskus niiden sijasta käytetään isoja kirjaimia K, L, M, N, O, P. Ensimmäistä pääkuorta lukuun ottamatta pääkuorilla on useita alakuoria.

Pääkvanttiluku n ja sivukvanttiluku l määrittelevät yhdessä alakuoren. Sivukvanttiluvun arvoille 0, 1, 2, 3 ja 4 käytetään kirjaintunnuksia s, p, d, f ja g. Pääkvanttiluvun arvo ilmaisee sitä vastaavien sivukvanttilukujen määrän, joten ensimmäisellä pääkuorella on yksi alakuori, toisella kaksi ja niin edelleen. Atomin alakuoret ovat siten 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, … .

Koska samalla alakuorella olevilla elektroneilla on sama energia, energiatasokaaviossa energiatilat ilmaistaan alakuorien tunnuksilla. Alakuorilla f ja g voi olla vain virittyneiden atomien elektroneita.

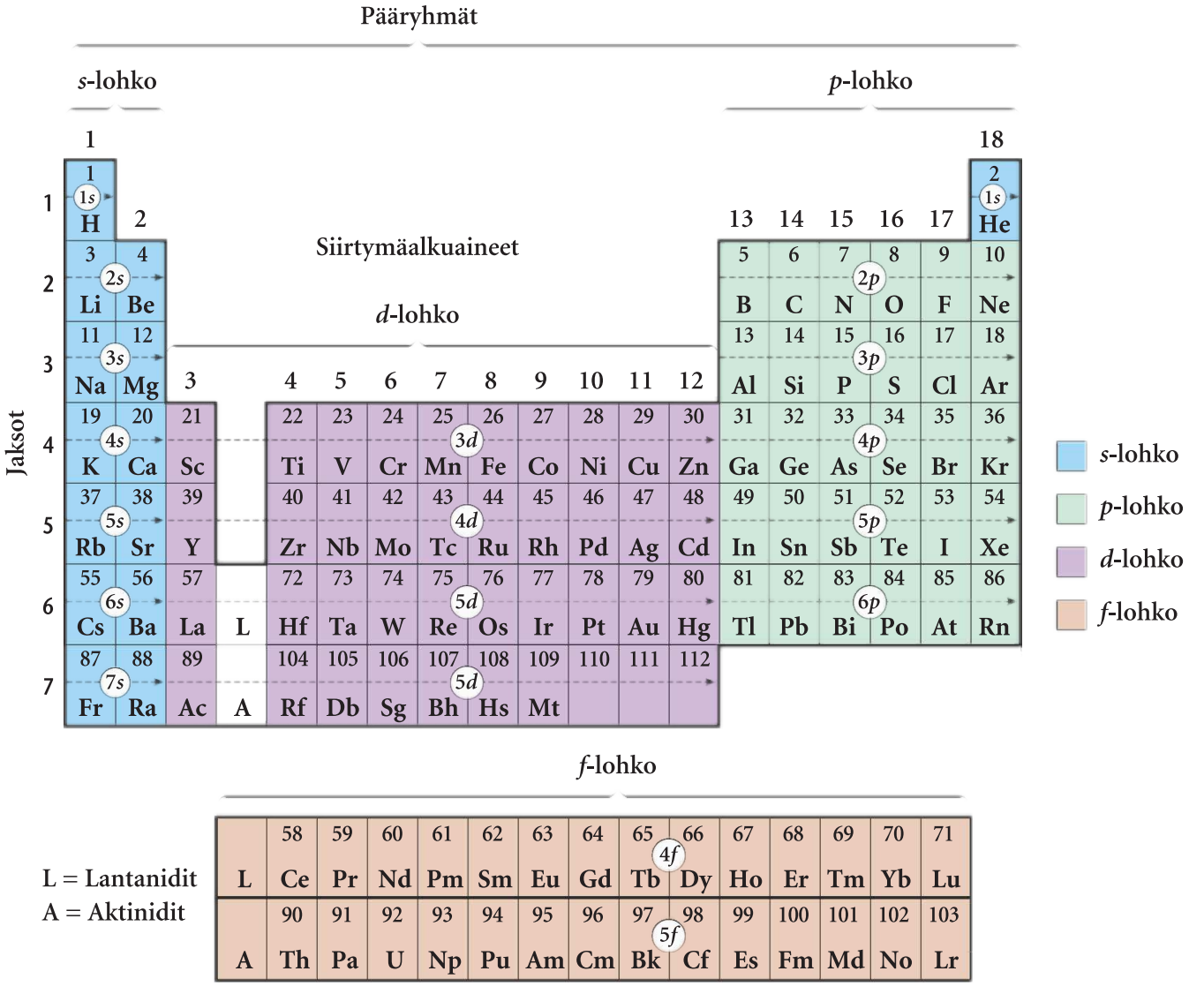
Atomin kuorimallin avulla voidaan muun muassa esittää alkuaineiden sijoittuminen jaksolliseen järjestelmään. Kuorimalli on vain atomin elektroniverhoa jäsentävä malli. Atomissa ei ole konkreettisesti mallin mukaisia pallokuoria.

Kemian 2. kurssissa opiskellaan periaatteet, joiden perusteella voidaan selvittää, miten elektronit asettuvat alakuorille eri alkuaineiden perustilassa olevissa atomeissa.

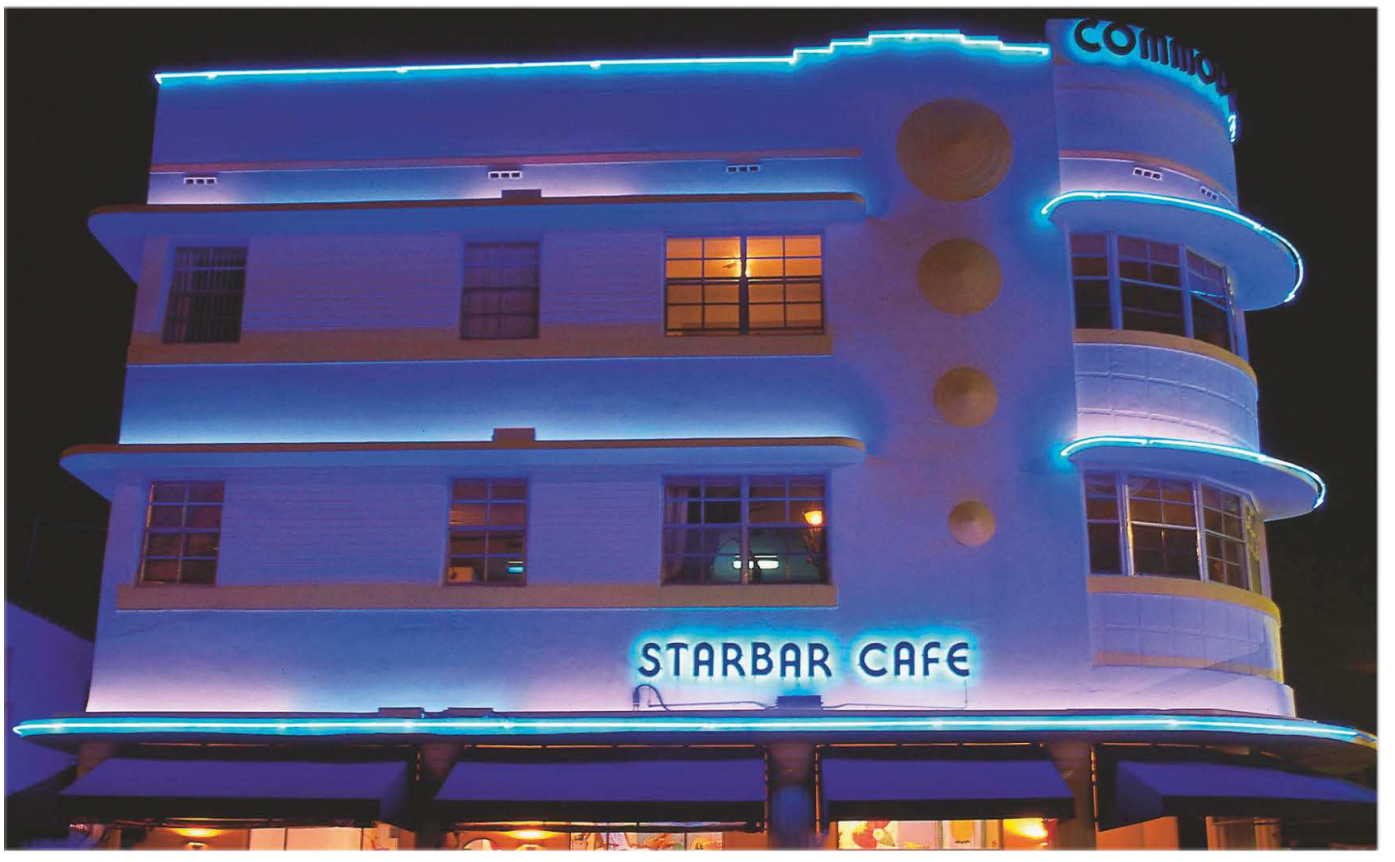


▲ **Osa litiumatomin energiatasokaaviosta ja mahdollisista siirtymistä. Eri alkuaineilla energiatasoja vastaavat energiat ovat erisuuruisia, joten tasot sijoittuvat toisiinsa nähden eri tavoin.**

Tehtäviä ➢ 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19



▲ **Jaksollisessa järjestelmässä alkuaineet on ryhmitelty atomin järjestysluvun ja elektronirakenteen mukaan. Esimerkiksi vedyllä ja alkalimetalleilla on ulkokuorella yksi elektroni, jonka ne luovuttavat herkästi. Ne ovat siten kemiallisesti aktiivisia. Jalokaasut ovat 18. ryhmän alkuaineita: niiden uloimmat elektronikuoret ovat täynnä ja ovat siten kemialliset passiivisia.**

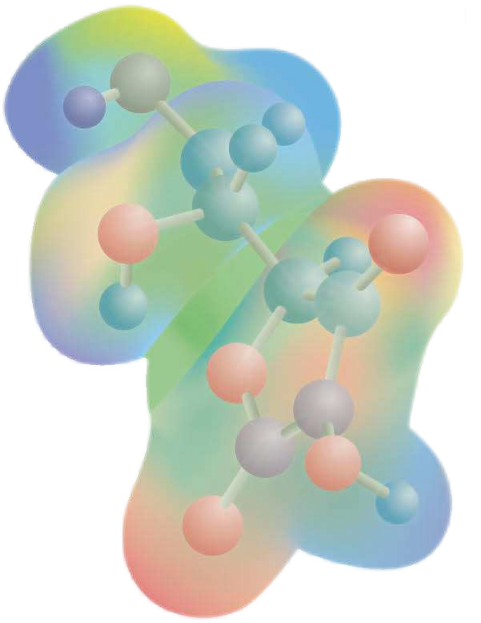


▶ **Neonvaloputkista tehdään näyttäviä valomainoksia. Niissä atomit viritetään pienipaineisissa kaasuputkissa, ja viritystilan purkautuessa atomit lähettävät näkyvää valoa. Valon väri eli aallonpituus riippuu atomin elektroniverhon rakenteesta.**

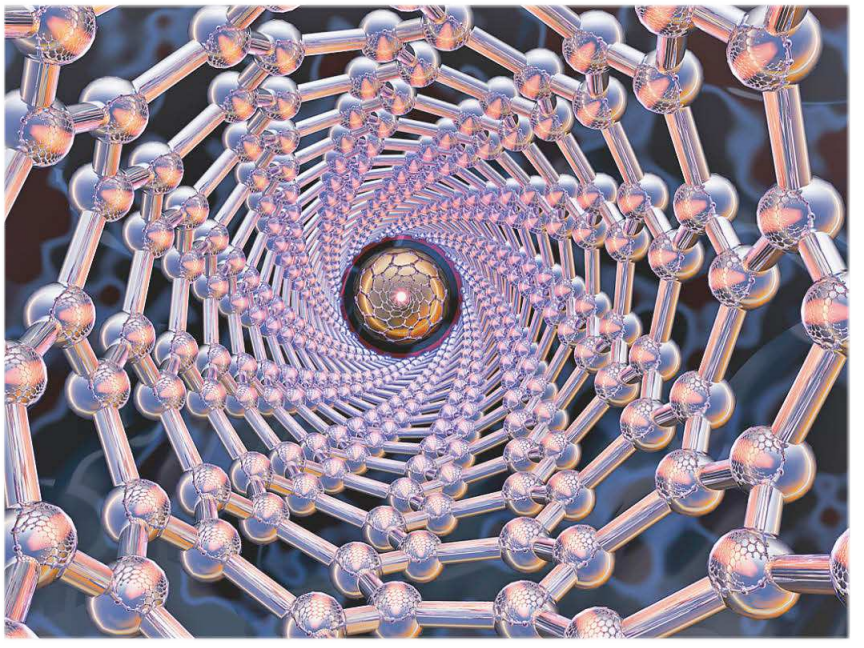
3.3 Kvanttimekaanisia ilmiöitä

Bohrin atomimallin mukaan vetyatomin energia on kvantittunut, ja se voi saada vain tiettyjä erillisiä arvoja. Kvantittuminen näkyy kaikessa, mitä fysiikassa nykyisin tehdään. Tähän lukuun on koottu esimerkkejä kvantti-ilmiöistä. Aluksi tarkastellaan fluoresenssi-ilmiötä ja röntgensäteilyn karakteristisen säteilyn syntymekanismia. Lopuksi esimerkissä 3 esitetään spektrianalyysin periaate. Luvun kuviin on koottu esimerkkejä kvanttimekaniikan modernin tutkimuksen sovelluksista.

▲ **Puolijohdekomponenttien koko on jatkuvasti pienentynyt ja teho kasvanut. Uusimpien tutkimuskäytössä olevien komponenttien koko on nanometrien luokkaa, jolloin puhutaan nanoelektroniikasta. Kvantti-ilmiöt ovat tärkeässä asemassa, kun näitä pieniä komponentteja hyödynnetään täysin uudenlaisissa sovelluksissa, kuten kvanttilaskennassa.**

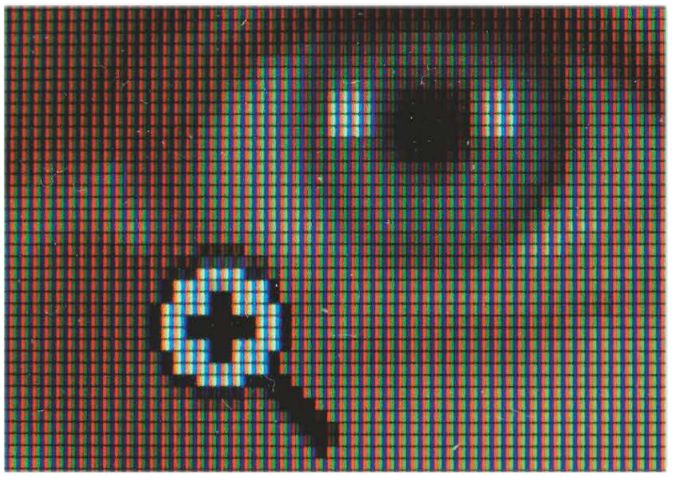


▲ **C-vitamiinimolekyylin ympärille on piirretty läpinäkyvä pinta, joka kuvaa elektronitiheyttä. Pinnan värit kuvaavat molekyylin elektronitiheydestä laskettua sähköstaattista potentiaalia, punainen negatiivista ja sininen positiivista. Sähköisen potentiaalin avulla voidaan selittää esimerkiksi C-vitamiinin vesiliukoisuus.**

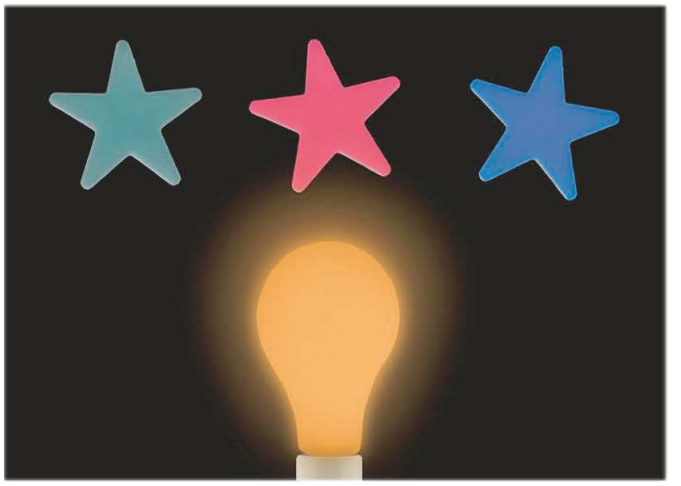


◀ **Hiilen putkimainen uusi rakenne, hiilinanoputki, löydettiin vuonna 1991. Se on vain muutaman atomikerroksen levyinen. Hiilinanoputkesta voidaan valmistaa sekä johteita että puolijohteita. Yksittäisen hiilinanoputken lujuusominaisuudet ovat erittäin hyvät. Rakennustekniikan kannalta mielenkiintoista on, että hiilinanoputken vetolujuus on noin 20 kertaa teräksen vetolujuutta suurempi. Jyväskylän yliopistossa kehitettiin 2000-luvun alussa menetelmä epoksin vahvistamiseksi hiilinanoputkilla. Teppo Nummisen tästä aineesta käyttämä maila kesti Torinon olympialaisissa kaikki pelit. Atomimittakaavan ilmiöitä hallitsee täysin kvanttimekaniikka.**

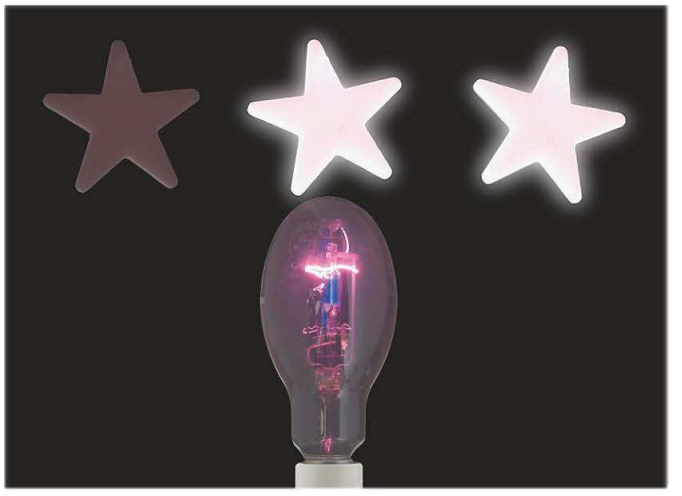
Fluoresenssi ja fosforenssi



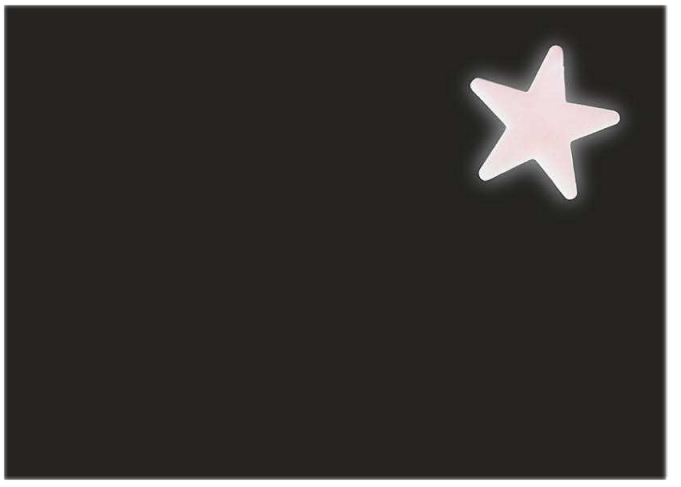
▶ **Television kuva syntyy fluoresenssin avulla. Television kuvaputken lähettämä elektronisuihku virittää kuvaruudun sisäpinnalla olevan loisteaineen atomeja. Viritystilan purkautuessa loisteaine lähettää valoa. Plasma- ja LCD-TV eivät perustu fluoresenssiin.**



▶ **Kuvan muovitähdistä kaksi oikeanpuoleista sisältävät loisteainetta, jota hehkulampun pitkäaaltoinen valo ei kykene virittämään. Kuvassa nähdään muovitähtien värit.**



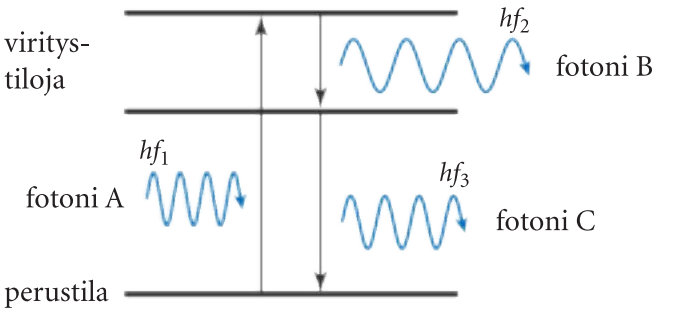
▶ **Ultraviolettisäteilyn aiheuttamat viritystilat purkautuvat välivaiheittain, jolloin loisteaineen atomit lähettävät kaksi tai useamman fotonin. Fotonien aallonpituus on suurempi kuin virittävän UV-valon. Koska UV-lamppu lähettää myös lyhytaaltoista näkyvää valoa, nähdään kolmas tähti himmeästi violetin värisenä.**



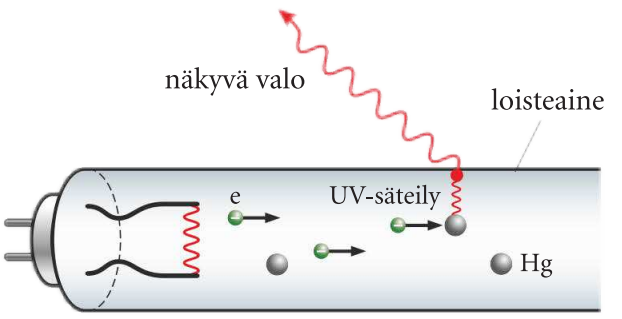
▶ **Oikeanpuoleisen tähden loisteaineen viritystilat purkautuvat hitaasti. Siksi tähti loistaa vielä jonkin aikaa sen jälkeen, kun UV-valo on sammutettu.**

Kun virittyneet atomit palaavat perustilaan, niiden absorboima energia vapautuu. **Viritystila voi purkautua myös vaiheittain usean eri energiatason kautta.**

Viritystilan purkautuminen voi tapahtua välittömästi (alle 10 ns:ssa) virittymisen jälkeen tai viritystila voi purkautua pitemmän ajan (mikrosekunneista vuorokausiin) kuluessa. Ilmiötä, jossa aine lähettää näkyvää valoa välittömästi virittymisen jälkeen, kutsutaan **fluoresenssiksi.** Jos aine säteilee valoa viipeellä, ilmiötä sanotaan **fosforenssiksi.** Tällöin aine on itsevalaiseva.



▲ **Fotoni A virittää atomin. Viritystilan purkautuessa välivaiheittain emittoituvan fotonin energia on virittävän fotonin energiaa pienempi, jolloin aallonpituus suurenee.**



▲ **Loistelampun näkyvä valo syntyy lasin sisäpinnassa olevassa loisteaineessa. Loisteaineen virittymisen aiheuttaa ultraviolettisäteily, jota syntyy matalapaineisessa elohopeahöyryssä, kun kiihdytetyt elektronit törmäilevät elohopea-atomeihin. Virittyneet elohopea-atomit säteilevät ultraviolettisäteilyä, jota loisteaineen atomit absorboivat. Palatessaan perustilaan loisteaineen atomit säteilevät näkyvää valoa.**

Tutki & kokeile

Tutki sinkkisulfidilevyn fluoresenssia.

1. Aseta sinkkisulfidilevyn päälle pimennetyssä huoneessa sininen ja punainen suodatin.
2. Valaise levyä valkoisella valolla. Mitä havaitset? Miten havainnot selitetään?

▲ Ilmiötä, joissa virittyneet atomit lähettävät näkyvää valoa, kutsutaan luminenssiksi. Jos molekyylin viritystila kestää lyhyen aikaa, luminenssia kutsutaan fluoresenssiksi, ja jos viritystila on pitkäikäinen, ilmiöstä käytetään nimitystä fosforenssi. Myös luonnossa havaitaan luminenssi-ilmiötä. Kiiltomadot tuottavat valoa kemiallisen reaktion tuloksena. Kiiltomatojen valoelimet ovat rauhasia, jotka sijaitsevat yhden tai useamman takaruumiin jaokkeen alapinnalla.

▲ Setelirahoissa käytetään turvamerkintöjä, jotka fluoresoivat ultraviolettivaloa.

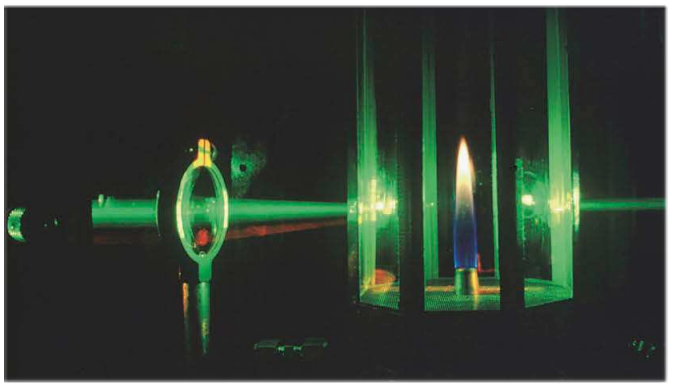
Tutki & kokeile

Tutki fluorenssi-ilmiötä. Työ tehdään pimennetyssä huoneessa.
Vie loisteputki Van de Graffin generaattorin lähelle.

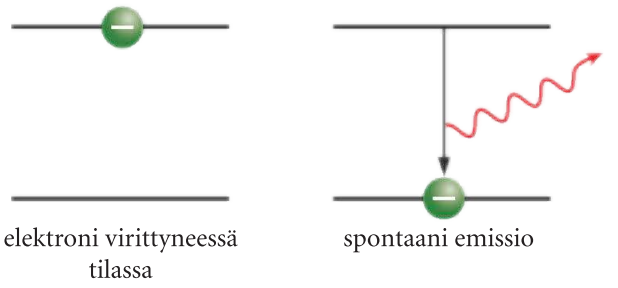
- Mitä havaitset?
- Miten havainnot selitetään?

Laser

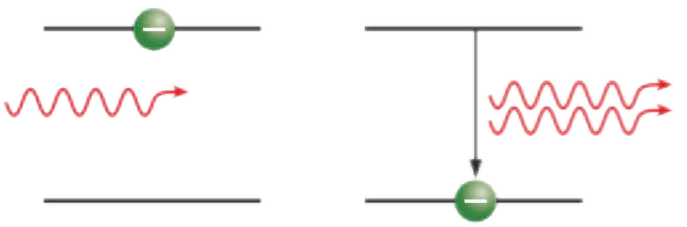
Laservalo on monokromaattista, eli sisältää vain yhtä aallonpituutta, ja koherenttia, eli kaikki aallot ovat samassa vaiheessa. Tällöin valonsäde voi edetä pitkiä matkoja leviämättä merkittävästi.



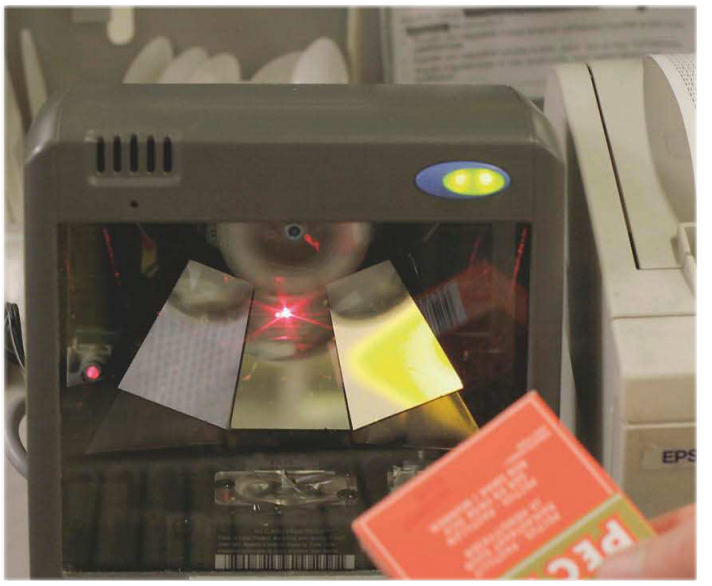
Viritystilan purkautuminen tapahtuu yleensä ilman mitään erityistä syytä. Tällöin tapahtuu **spontaani emissio**.



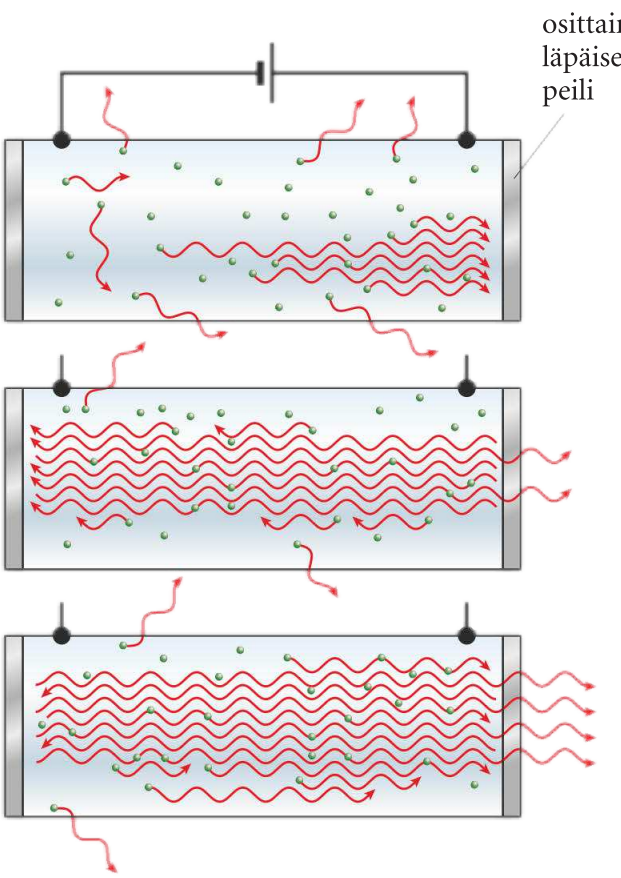
Viritystila voi purkautua myös silloin, kun viritetyn elektronin kanssa vuorovaikuttaa fotoni, jonka energia on sama kuin kyseisen elektronin viritystilan ja alemman tilan energioiden erotus. Tällöin vapautuu fotoni, jolla on täsmälleen sama energia kuin vuorovaikuttavalla fotonilla. Fotonien taajuus ja aallonpituus ovat samat. Tällöin fotonit etenevät samaan suuntaan samassa vaiheessa. Tapahtumaa kutsutaan **stimuloiduksi emissioksi**.



Laserissa (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) valo syntyy stimuloidun emission kautta. Punainen laservalo on peräisin nykyisin joko helium-neon-lasereista tai puolijohdelasereista. Argonlasereilla saadaan sinivihreää valoa.

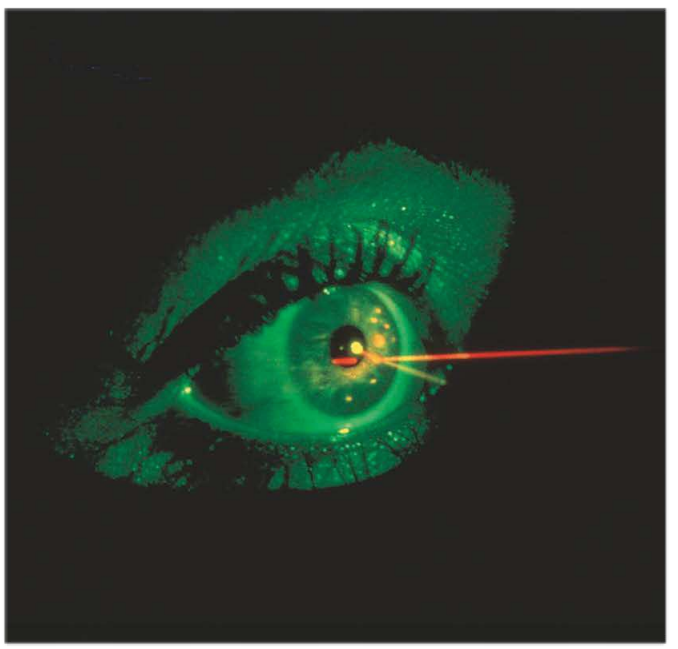


▲ **Viivakoodinlukijat toimivat laservalolla.**



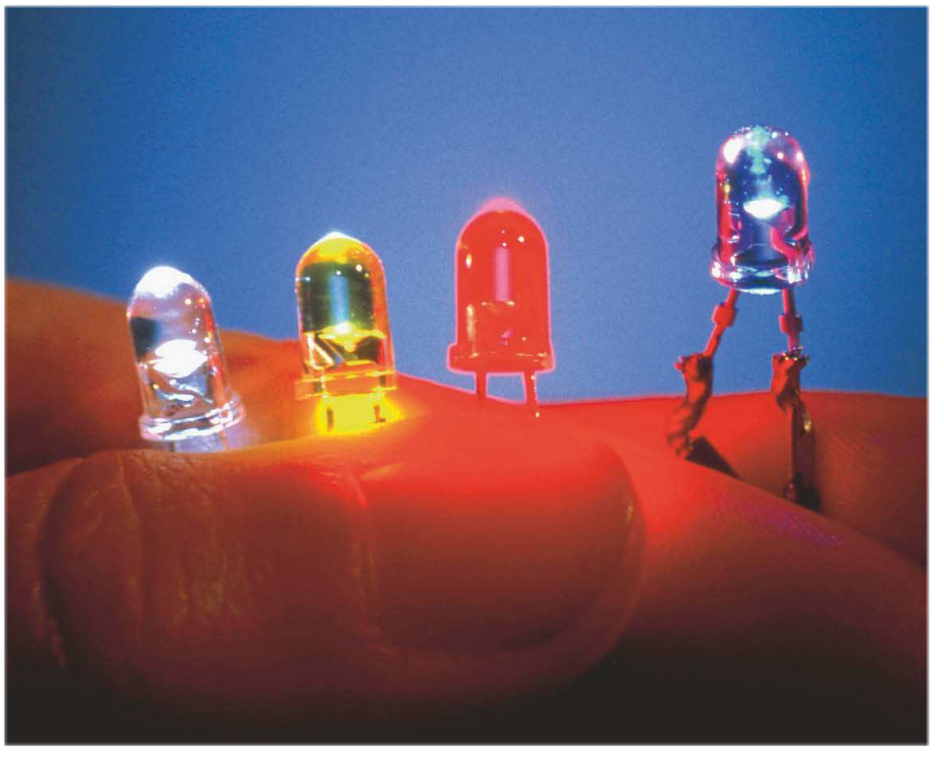
▲ **Elektroneja viritetään sopivassa aineessa pitkäikäiseen viritystilaan, jolloin suuri joukko atomeja on samanaikaisesti samanlaisessa tilassa. Kun yksi viritystila purkautuu, syntyvä fotoni aiheuttaa toisen samanlaisen viritystilan purkautumisen ja niin edelleen. Syntyy "ketjureaktio". Putken päihin asennetuista peileistä toinen on osittain läpäisevä. Valo saadaan peilien avulla kulkemaan putkessa edestakaisin, jolloin laservalon intensiteetti kasvaa. Valo tulee ulos osittain läpäisevän peilin kautta.**

Lasereita käytetään optisessa tiedonsiirrossa, CD- ja DVD-levyjen luku- ja kirjoituspäissä, tulostimissa, viivakoodilukijoissa ja muun muassa osoitinkynissä. Silmälääkärit käyttävät laseria silmän näkövirheiden korjausleikkauksissa. Laserilla voidaan myös mitata tarkasti etäisyyksiä, esimerkiksi Maata kiertävän satelliitin tai Kuun etäisyys Maasta voidaan määrittää muutaman senttimetrin tarkkuudella. Suuritehoisilla lasereilla voidaan porata, leikata ja työstää metallia.



▲ **Helium-neon-laseria käytetään silmäleikkauksessa. Lasersäde ohjataan pupillin läpi silmään. Taittovirheen laserkorjaus tarkoittaa sarveiskalvon etupinnan uudelleen muotoilua.**

▲ **Laserleikkauksessa lasersäde kohdistetaan linssin avulla polttopisteeksi leikattavaan kohtaan. Polttopiste kuumenee, jolloin työstettävä materiaali sulaa, palaa tai höyrystyy. Teollisuudessa laserleikkauksissa käytetään tavallisimmin CO_2-laseria.**

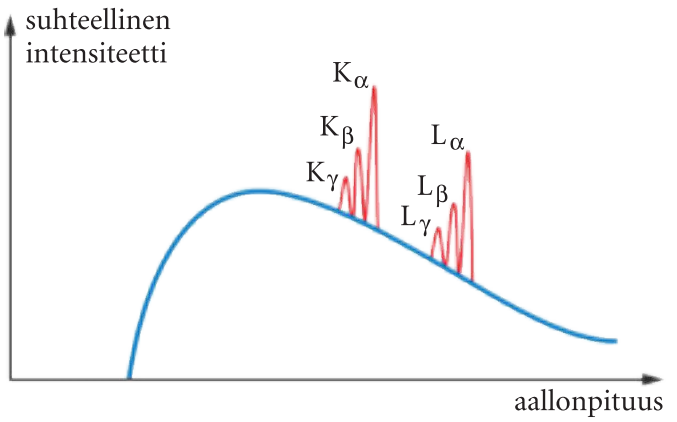


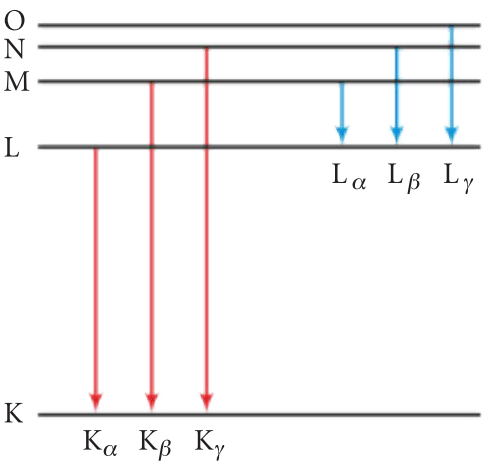
◀ **Sinisen ja valkoisen LED-valon kehittäminen vaati kolmekymmentä vuotta. Vuonna 2006 japanilainen Shuji Nakamura sai tästä työstä suomalaisen Millenium-teknologiapalkinnon. LED:n valo syntyy p- ja n-tyypin puolijohteiden rajapinnassa. Kun LED:n läpi kulkee sähkövirta, elektronit siirtyvät rajakerroksen yli aukkoihin ja ne ”putoavat” alhaisempaan energiatilaan. Tämän siirtymisen pitää olla energeettisesti tarpeeksi suuri, jotta LED säteilee lyhytaaltoista sinistä valoa. LED:ien energiantarve on pienempi kuin tavallisten lamppujen, joissa lämmöksi muuttuu 95 % siihen tulevasta sähköenergiasta. Siksi LED:t soveltuvat hyvin esimerkiksi kehitysmaihin aurinkosähköjärjestelmiin. Ne ovat myös kestävämpiä kuin hehkulamput tai loisteputket. Sininen laser on korvaamassa vanhemman punaisen laserin sekä CD-levyjen että DVD-levyjen informaation tallentajana ja soittimien lukijana. Koska sen aallonpituus on lyhyempi, informaation tallennuskapasiteetti kasvaa viisinkertaiseksi.**

Karakteristinen röntgensäteily

Luvussa 2.3 tarkasteltiin röntgenputken rakennetta ja kahden erilaisen prosessin kautta syntyvää röntgensäteilyä.

Anodimetalliin törmäävät elektronit voivat ionisoida anodin atomeja irrottamalla elektroneja niiden alimmilta kuorilta. Irronneen elektronin tilalle ”putoaa” elektroni joltain ylemmältä kuorelta ja atomi emittoi kvantin, jonka energia vastaa kuorien energiatasojen erotusta. Tällöin syntyy anodimetallille tyypillistä **karakteristista säteilyä** eli **ominaissäteilyä**. Karakteristisen säteilyn syntymekanismin ymmärtämisen kannalta on tärkeää atomin elektroniverhorakenteen tunteminen.





▲ **Jos täyttyminen tapahtuu K-kuorelle, syntyy K-spektri. Vastaavasti, kun täyttyminen tapahtuu L-kuorelle, syntyy L-spektri. Eri siirtymät merkitään kirjaimilla α, β, γ niin, että lyhintä siirtymää (pienintä energiaa) vastaa α, seuraavaa β ja niin edelleen. α-viivan intensiteetti on aina suurempi kuin β-viivan intensiteetti.**

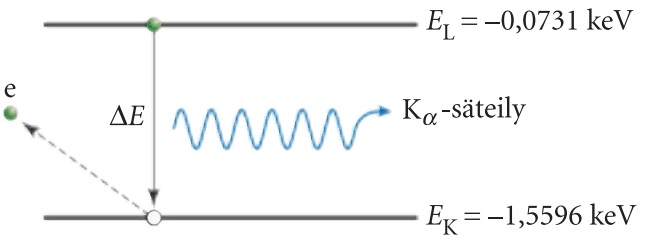
Esimerkki 2

Alumiinin K-kuoren elektronin ionisaatioenergia on 1,5596 keV ja L-kuoren 0,0731 keV. Kuinka suuri syntyvän karakteristisen K_α-röntgensäteilyn aallonpituus on?

Ratkaisu

Koska K-kuoren ionisaatioenergia on 1,5596 keV, niin K-kuoren energia on –1,5596 keV. Vastaavasti L-kuoren energia on –0,0731 keV.

Kun K-kuorelta poistuu elektroni, niin syntyvä aukko voi täyttyä L-kuoren elektronilla.



K_α-säteilyn energia on energiatasojen välinen erotus

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_L - E_K \\ &= -0{,}0731\,\text{keV} - (-1{,}5596\,\text{keV}) \\ &= 1{,}48650\,\text{keV}.\end{aligned}$$

Einsteinin valon kvanttiteorian perusteella

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda},$$

josta ratkaistaan syntyvän röntgensäteilyn aallonpituus

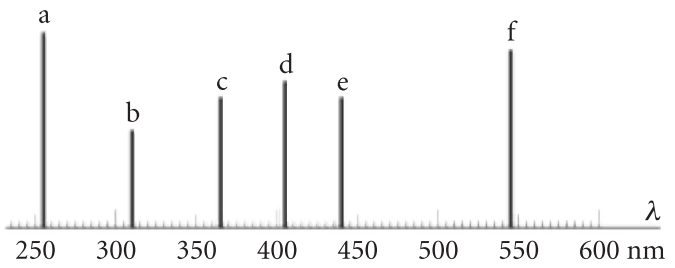
$$\begin{aligned}\lambda &= h\frac{c}{\Delta E} \\ &= 4{,}136 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot \frac{2{,}998 \cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}48650 \cdot 10^3\,\text{eV}} \\ &= 0{,}8341559 \cdot 10^{-9}\,\text{m} \approx 0{,}8341\,\text{nm}.\end{aligned}$$

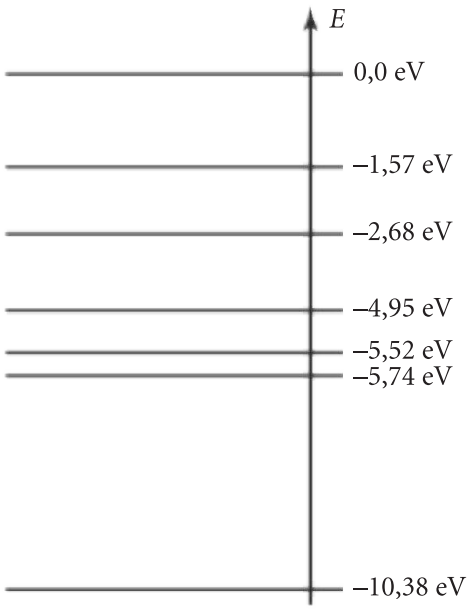
Vastaus

Syntyvän röntgensäteilyn aallonpituus on 0,8341 nm.

Esimerkki 3

Oheisissa kuvissa on esitetty elohopeatäytteisestä kaasupurkausputkesta otettu emissiospektri ja osa elohopean energiatasokaaviosta. Mitä siirtymiä spektriviivat vastaavat? Merkitse siirtymät energiatasokaavioon.





Ratkaisu

Kun atomi siirtyy virittyneestä tilasta alempaan energiatilaan, se lähettää säteilyä, joka näkyy emissiospektrissä. Selvitetään, mitä siirtymiä eri spektriviivat vastaavat.

Luetaan spektristä viivojen aallonpituudet ja lasketaan aallonpituuksia vastaavien fotonien energiat. Esimerkiksi aallonpituutta 255 nm vastaavan fotonin energia on

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{4{,}136 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{255 \cdot 10^{-9}\ \text{m}}$$

$$= 4{,}8626\,\text{eV}.$$

Fotonien energiat on laskettu taulukkoon.

Spektri-viiva	Aallonpituus (nm)	Kvantin energia (eV)
a	255	4,863
b	310	3,999
c	365	3,397
d	405	3,062
e	435	2,851
f	545	2,275

Lasketaan sitten mahdolliset siirtymät eli energiatasojen energioiden erotukset.

Esimerkiksi

–5,74 eV – (–10,38 eV) = 4,64, ei viivaa

–5,52 eV – (–10,38 eV) = 4,86 eV, siirtymä a

–4,95 eV – (–10,38 eV) = 5,43 eV, ei viivaa

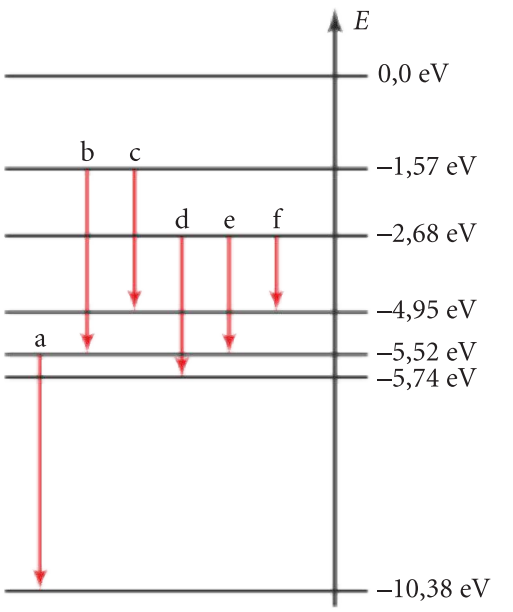
ja niin edelleen.

Verrataan sitten fotonien energioita mahdollisiin siirtymiin eli tasojen välisiin energiaeroihin. Elohopea-atomin spektriviivat on koottu taulukkoon.

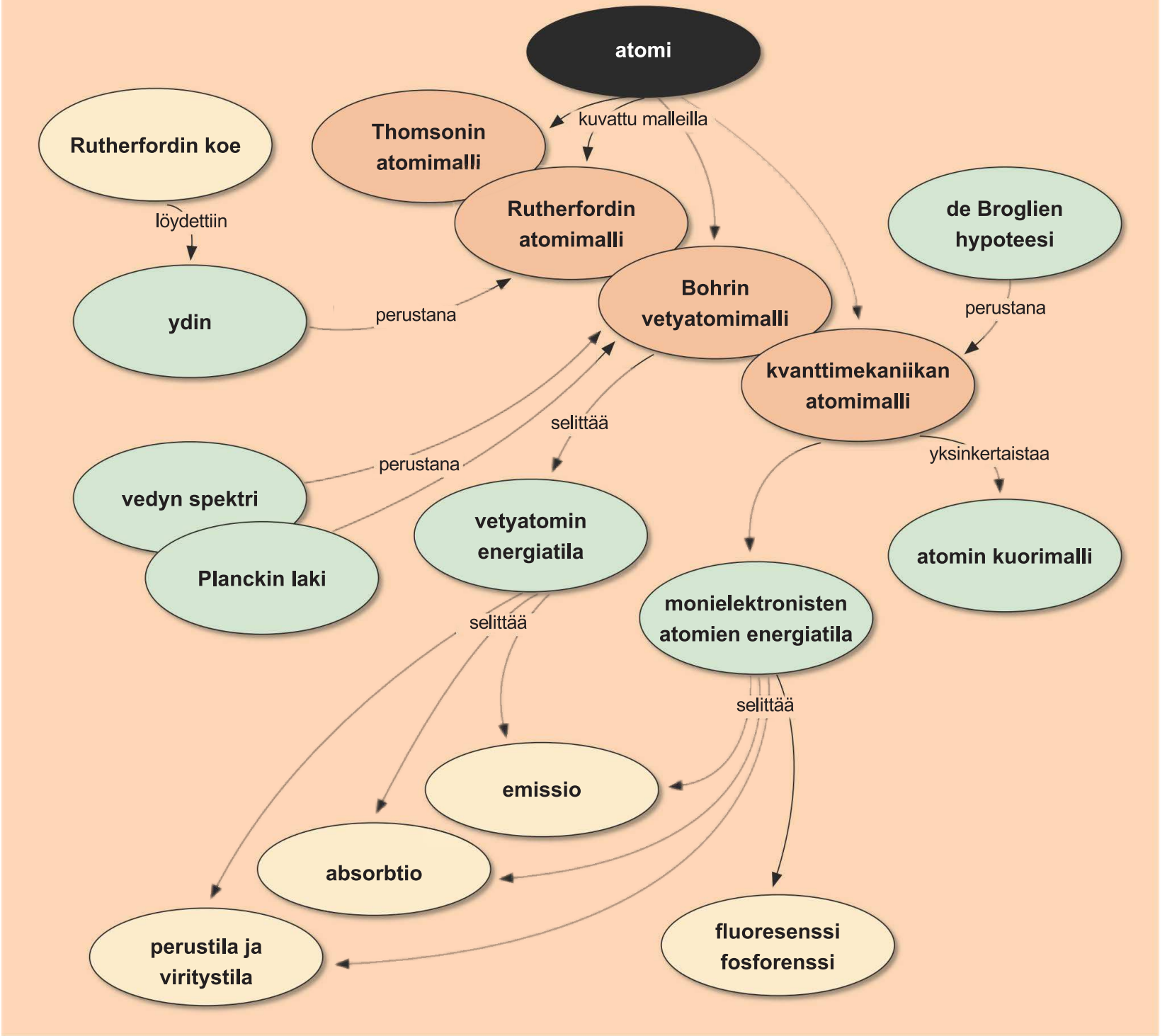
$E_n - E_m$	Spektri-viiva
–5,52 eV – (–10,38 eV) = 4,86 eV	a
–1,57 eV – (–5,52 eV) = 3,95 eV	b
–1,57 eV – (–4,95 eV) = 3,38 eV	c
–2,68 eV – (–5,74 eV) = 3,06 eV	d
–2,68 eV – (–5,52 eV) = 2,84 eV	e
–2,68 eV – (–4,95 eV) = 2,27 eV	f

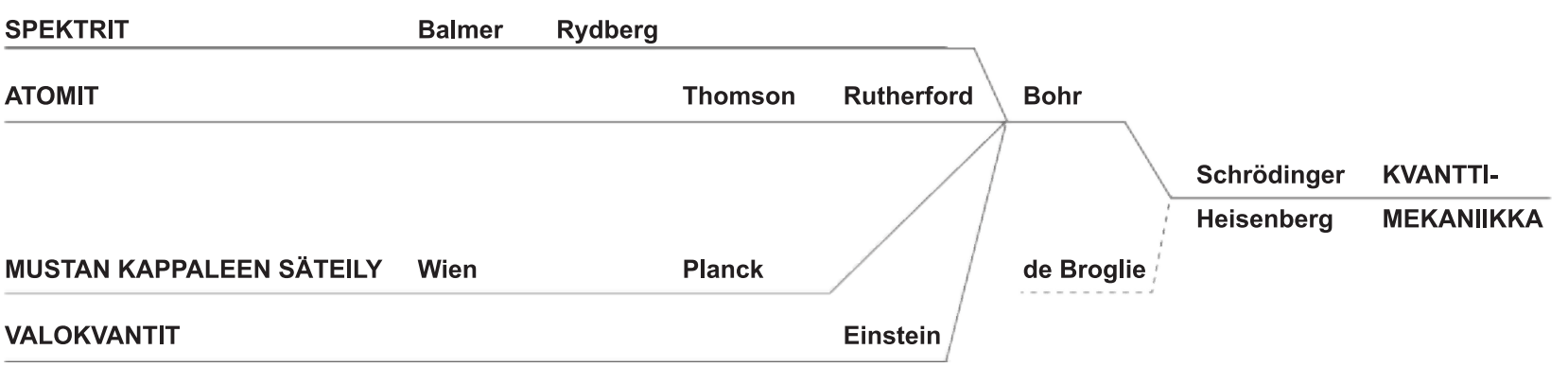
Vastaus

Elohopean spektriviivat ovat peräisin kuvassa esitetyistä siirtymistä.



YHTEENVETO





Keskeisiä kehitysvaiheita kohti kvanttimekaniikkaa.

Tehtäviä ➢ 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- Bohrin vetyatomimalli
- vetyatomin energiatilat
- absorptio
- emissio
- fluoresenssi ja fosforenssi
- karakteristinen röntgensäteily

3.1

1. **a)** Miksi alfahiukkasen pitäisi mennä Thomsonin atomimallin mukaan atomin läpi lähes suuntaansa muuttamatta?
b) Miksi Rutherfordin ”aurinkokuntamallin” mukaisen atomin pitäisi klassisen fysiikan mukaan romahtaa kasaan?
c) Bohr muotoili atomimallinsa viiden oletuksen varaan. Mitkä näistä ovat klassisen fysiikan mukaisia ja mitkä eivät? Miksi?

2. Selitä Rutherfordin sirontakoe. Mikä sen merkitys oli aineen rakenteen ymmärtämisessä?

3. **a)** Rutherfordin ja Bohrin atomimallin kokeellinen tausta.
b) Bohrin vetyatomimallin keskeiset oletukset. (Yo kevät 2003, teht. 9.)

4. **a)** Kuinka suuri on vetyatomin ensimmäisen viritystilan energia?
b) Kuinka suuri on vetyatomin toisen viritystilan energia?
c) Kuinka suuri näiden tilojen energioiden erotus on?

5. **a)** Mikä on Lymanin sarjan pienin aallonpituus?
b) Mikä on Bracketin sarjan suurin aallonpituus?

6. Laboratoriossa tutkittiin hehkuvan vetykaasun spektriä. Spektrissä havaitaan voimakas sinivihreä viiva, jonka tarkkaa aallonpituutta ei laitteella voida määrittää, mutta sen arvioidaan olevan hieman alle 500 nm. Laske viivan tarkka aallonpituus. Mitä energiatilojen eroa viiva vastaa?

7. **a)** Onko oikein kysyä, millä aallonpituusalueella vedyn sisimmällä radalla oleva elektroni säteilee Bohrin atomimallin mukaan?
b) Miten säteily atomeissa syntyy?
c) Mikä on vetyatomin lähettämän säteilyn pienin mahdollinen aallonpituus?

8. Tähtienvälisessä avaruudessa esiintyy niin sanottuja Rydbergin atomeja, jotka ovat korkeaan energiatilaan virittyneitä vetyatomeja.
a) Mille aallonpituudelle ja taajuudelle vastaanotinantenni on viritettävä, jotta havaitaan signaali elektronista, joka siirtyy energiatilasta 109 energiatilaan 108?
b) Kuinka suuri on näiden tilojen energioiden erotus?
c) Kuinka paljon tarvitaan energiaa, jotta vetyatomin perustilassa oleva elektroni siirtyy tilaan 109?

3.2

9. **a)** Kuinka suuri pitää sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden olla, jotta se pystyy ionisoimaan perustilassa olevan vetyatomin?

b) Sähkömagneettinen säteily pystyy siirtämään perustilassa olevan vetyatomin elektronin toiseen viritystilaan. Laske säteilyn aallonpituus ja taajuus.

10. **a)** Miksi vetyatomin spektrissä on useita eri viivoja, vaikka vetyatomissa on vain yksi elektroni?

b) Pohdi, voiko vetyatomin ionisoitumisenergian 13,6 eV perusteella päätellä vetyatomin säteen.

c) Kuinka monta erilaista fotonia vetyatomi voi emittoida, jos se on kolmannessa viritystilassa?

11. **a)** Miten emissiospektrin syntyminen selitetään energiatasokaavion avulla?

b) Miten absorptiospektrin syntyminen selitetään energiatasokaavion avulla?

c) Miten emissio- ja absorptiospektrin erot ja yhtäläisyydet selitetään energiatasokaavion avulla?

12. **a)** Laske sen säteilyn aallonpituus, jolla vetyatomi saataisiin virittymään toisesta energiatilasta viidenteen energiatilaan.

b) Kuinka suuri energia on fotonilla, jonka vetyatomi emittoi, kun mainittu viritystila purkautuu perustilaan.

13. Heliumatomin ionisoitumisenergia on 24,6 eV.

a) Kuinka suuri on sen säteilyn aallonpituus, joka pystyy ionisoimaan heliumatomin?

b) Saman ionisoitumisen voi aiheuttaa myös heliumatomiin törmäävä elektroni. Kuinka suuri törmäävän elektronin nopeuden täytyy olla?

14. Elohopea-atomin eräiden viritystilojen energiat ovat –7,7 eV, –6,7 eV ja –4,9 eV.

a) Piirrä energiatasokaavio ja merkitse siihen mahdolliset siirtymät.

b) Mitkä ovat niiden emissiospektrin aallonpituudet ja elohopeasta säteilevien fotonien energiat, jotka voidaan selittää näillä viritystiloilla?

15. Natriumatomin perustilan energia on –5,14 eV. Kun natriumatomin eräs viritystila purkautuu ja elektroni siirtyy perustilaan, havaitaan keltaista valoa, jonka aallonpituus on 589,0 nm. Kuinka suuri natriumatomin tämän viritystilan energia on?

16. **a)** Mikä on valon (sähkömagneettisen säteilyn) suurin aallonpituus, joka voi absorboitua vetyatomiin?

b) Mikä on seuraavaksi suurin aallonpituus, joka voi absorboitua?

17. **a)** Kuinka monta Bohrin vetyatomimallin sallittua energiatilaa on energioiden –13,6 eV ja –0,212 eV välissä?

b) Mikä on seuraavissa siirtymissä vetyatomin emittoiman fotonin taajuus $2 \rightarrow 1$ ja $4 \rightarrow 2$?

18. Vetyatomin absorptiospektrissä on viiva, jonka aallonpituus on 102,5 nm.

a) Kuinka suuri on spektriviivaa vastaava viritysenergia, ja miten tämä viiva on syntynyt?

b) Mitä aallonpituuksia havaitaan vetykaasun lähettämässä fluoresenssisäteilyssä, kun spektriviivaa 102,5 nm vastaava viritystila purkautuu?

19. Auringosta peräisin olevat protonit ajautuvat aurinkotuulen mukana Maan magneettikenttään. Kun protonit törmäävät ilmakehän happiatomeihin magneettikentän ohjaamina, happiatomit virittyvät. Revontulivaloa, jonka aallonpituus on 558 nm, syntyy, kun happiatomin korkea viritystila E_k purkautuu alempaan viritystilaan E_a.

a) Kuinka suuri on energiatilojen E_k ja E_a välinen erotus?

b) Kuinka suuri nopeus protoneilla tulee vähintään olla, jotta ne pystyisivät saamaan aikaan kyseisen revontulivalon? Lopputilan E_a korkeus perustilaan nähden on noin 1,96 eV.

c) Piirrä prosessia kuvaava energiatasokaavio.

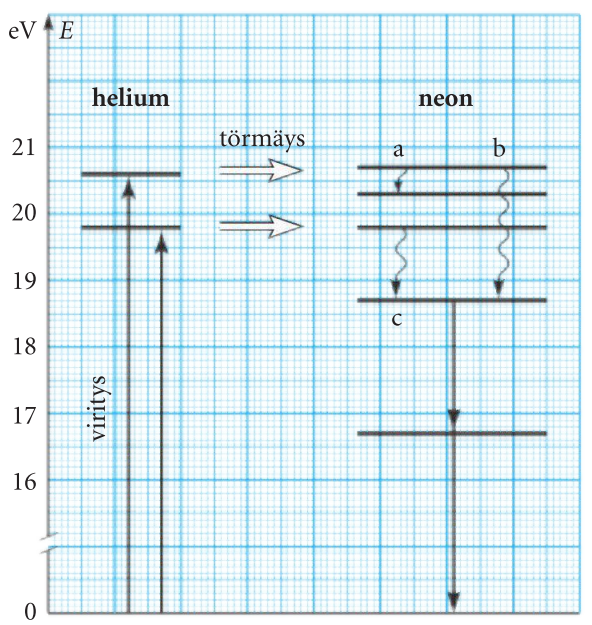
3.3

20. **a)** Selitä ilmiöt fluoresenssi ja fosforenssi.

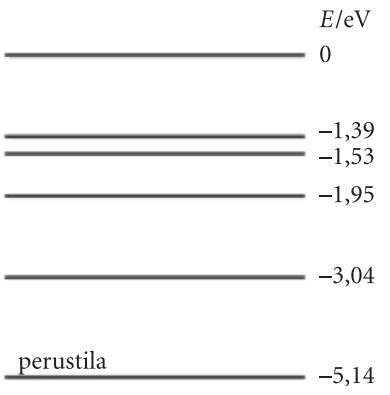
b) Selitä lyhyesti valon vahvistaminen säteilyn stimuloidun emission avulla.

c) Laserin valon tärkeimmät ominaisuudet.

21. Oheisessa kuviossa on esitetty helium-neon-laserin yksinkertaistettu energiatasokaavio. Aaltonuolilla a, b ja c on merkitty mahdolliset lasersiirtymät (stimuloitu emissio). Laske siirtymiä vastaavat aallonpituudet. Minkä väristä on näistä siirtymistä syntyvä valo? (Yo syksy 1989, teht. 7b)



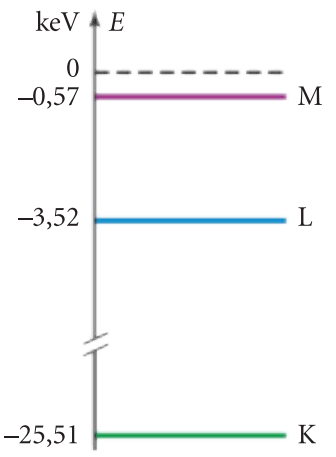
22. Koska natriumilla on täysien pääkuorien ulkopuolella yksi elektroni, sitä voidaan tarkastella yksielektronisena vedyn kaltaisena atomina. Kuvassa on esitetty yksinkertaistettu osa natriumin energiatasokaaviosta. Mitä aallonpituuksia voi esiintyä natriumkaasusta tulevassa säteilyssä, jos perustilassa olevia natriumatomeja säteilytetään valolla, jonka fotonien maksimienergia on 3,3 eV?



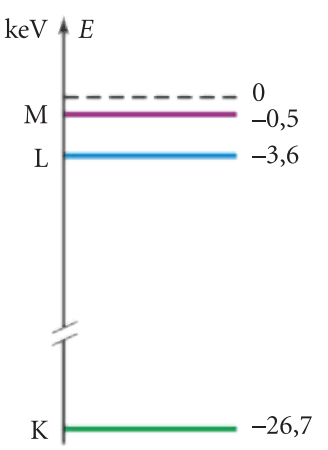
23. Kuvassa on esitetty yksinkertaistetusti hopea-atomin elektronikuoria vastaavat energiatasot.

a) Kun hopeanäytettä pommitetaan riittävän suurenergisillä elektroneilla, atomista irtoaa K-kuoren elektroni. Kuinka suurella jännitteellä elektronit täytyy vähintään kiihdyttää?

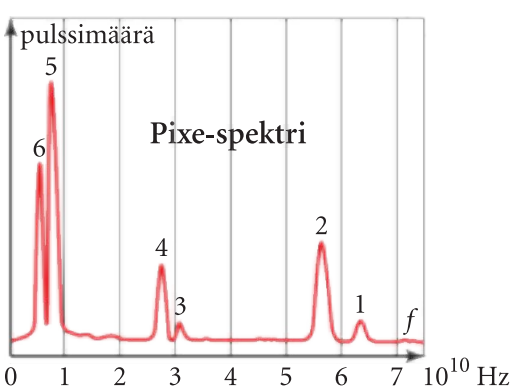
b) Millaista säteilyä syntyy, kun elektronit, joilla on a-kohdassa laskettu energia, törmäävät kiinteään hopeanäytteeseen? (Yo kevät 1997, teht. 14)



24. Raskaan alkuaineen atomissa on sisimmän elektronikuoren (K-kuoren) elektroneilla keskenään sama energia, kuten vastaavasti myös seuraavien kuorien eli L- ja M-kuorien elektroneilla (likimäärin). Kuva A esittää kadmiumatomin elektronien yksinkertaistettua energiakaaviota. Kuvassa B on röntgensäteilyn spektri, joka on syntynyt kiihdytetyn protonisuihkun osuessa vanhaksi väitetyn taidemaalauksen pinnassa olevaan väriaineeseen (hiukkasherätteinen röntgenemissio eli PIXE). Spektrin perusteella väriaine osoittautui kadmiumpunaiseksi, mikä paljasti taulun tällä vuosisadalla maalatuksi. Mitkä spektrin piikeistä kertovat näytteen sisältävän kadmiumia? Sijoita näitä vastaavat siirtymät energiatasokaavioon. (Yo, syksy 1993, teht. 7)



A

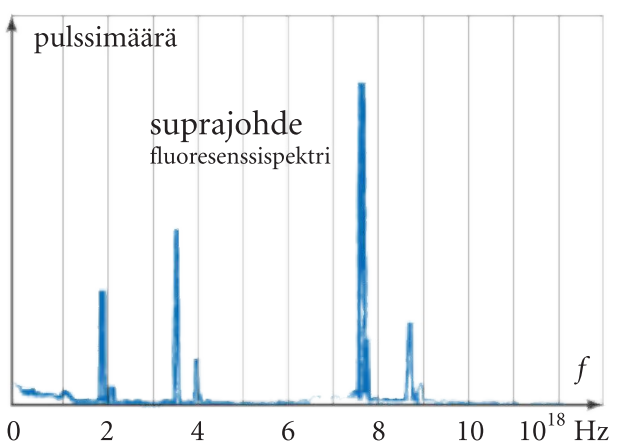


B

25. Isotooppiherätteinen röntgenfluoresenssianalyysi on kohdetta vahingoittamaton menetelmä, jossa tutkittavaan näytteeseen kohdistettu radioisotoopin gammasäteily saa näytteen atomit lähettämään alkuaineelle ominaista röntgensäteilyä. Erään keraamisen suprajohteen koostumusta tutkittiin laboratoriossa ^{241}Am-herätteisellä menetelmällä, jolloin saatiin kuvan röntgenfluoresenssispektri. Päättele oheisen taulukon avulla, mitä alkuaineita kyseinen suprajohde sisältää. (Yo syksy 1998, teht. 10b)

Eräitä K-ominaissäteilyn energioita

Alkuaine	$E_{K\alpha}$ (keV)	$E_{K\beta}$ (keV)
Ti	4,5	4,9
Cr	5,4	5,9
Fe	6,4	7,0
Cu	8,0	8,9
As	10,5	11,7
Br	11,9	13,3
Y	14,9	16,7
Mo	17,4	19,6
Ag	22,1	24,9
Sb	26,3	29,7
Ba	32,1	36,3
Ce	34,6	39,3



26. **a)** Mitä tarkoittaa karakteristinen (ominais-) röntgensäteily?

b) Mikä pitää olla röntgenputken kiihdytysjännite, jotta sillä saataisiin aikaiseksi röntgensäteilyä, jonka pienin aallonpituus on 0,1 nm?

27. Aineen karakteristinen röntgensäteily syntyy, kun atomin elektroniverhon alimmalta kuorelta poistetaan elektroni ja syntynyt aukko täyttyy jonkin ylemmän kuoren elektronilla. Karakteristinen K_α-röntgensäteily syntyy, kun K-kuoren elektroni poistuu ja aukko täyttyy L-kuoren elektronilla. Magnesiumilla K-kuoren elektronin ionisaatioenergia on 1,3050 keV ja L-kuoren 51,4 eV.

a) Laske magnesiumin K_α-röntgensäteilyn energia ja aallonpituus.

b) Jos atomin ionisaatio saadaan aikaan elektronisuihkulla, jonka elektronit vuorovaikuttavat aineen kuorielektronien kanssa, mikä on pienin elektronien kiihdytysjännite, jolla saadaan aikaan K_α-säteilyä, jos kohtioaine on magnesiumia?

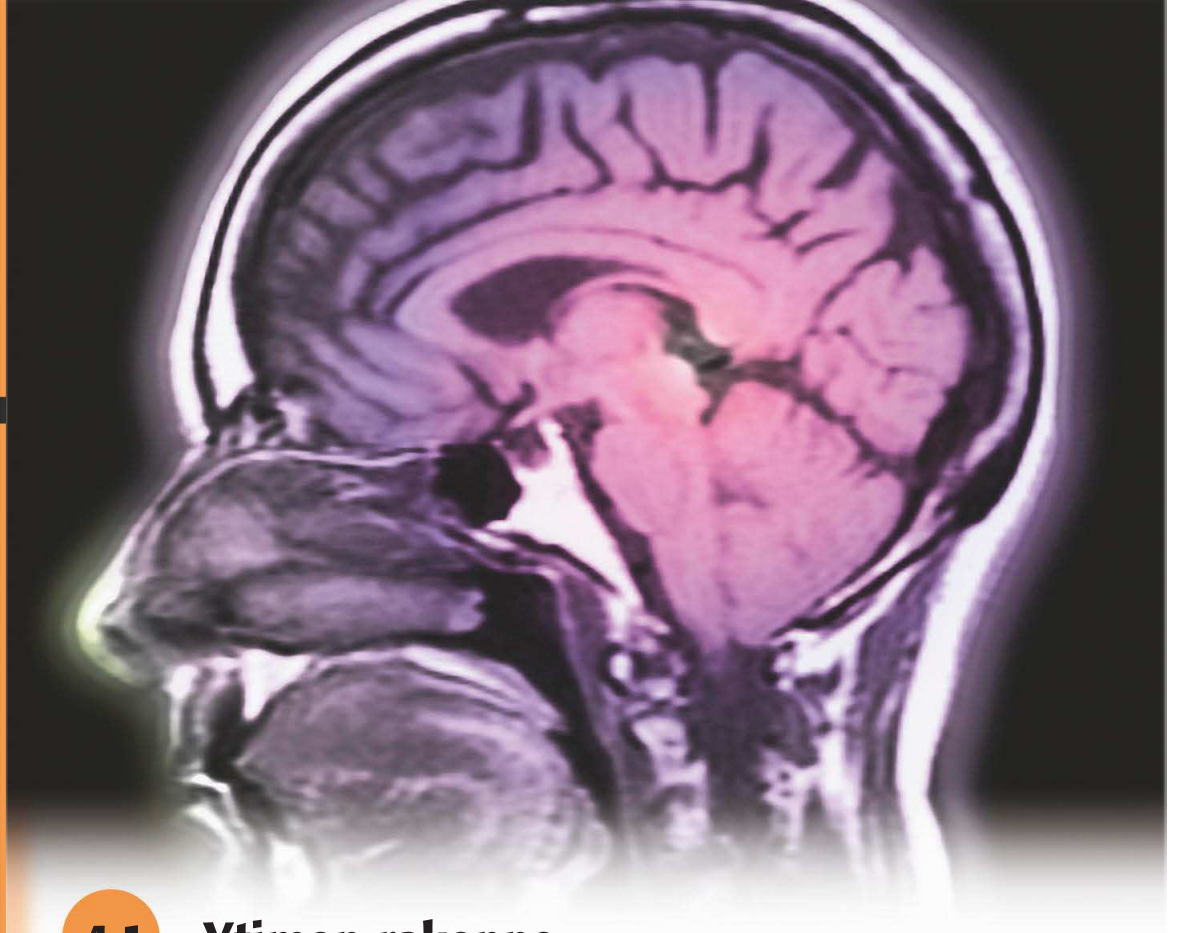
c) Laske elektronien nopeus niiden osuessa magnesiumkohtioon.
(TKK, TTY, LTY, OY ja ÅA insinööriosastojen valintakuulustelu 2003, teht. 6)

4

Atomin ydin

Ytimen rakenne alkoi selvitä yllättävän myöhään vasta, kun neutroni löydettiin vuonna 1932.

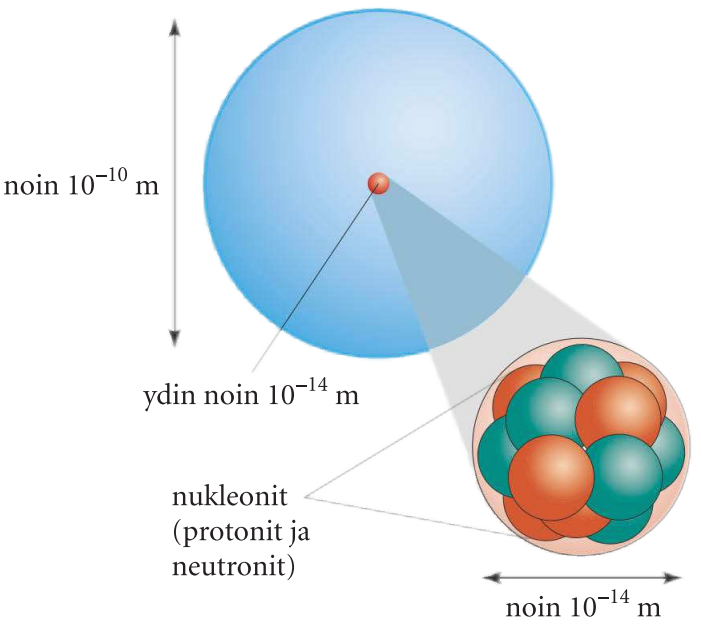
Tietoa atomin ytimen rakenteesta käytetään hyväksi muun muassa lääketieteessä sairauksien analysoinnissa ja hoidossa. Tässä luvussa käsitellään atomin ytimen rakennetta, ytimen rakenneosasten välistä voimaa ja ytimen sidosenergiaa.



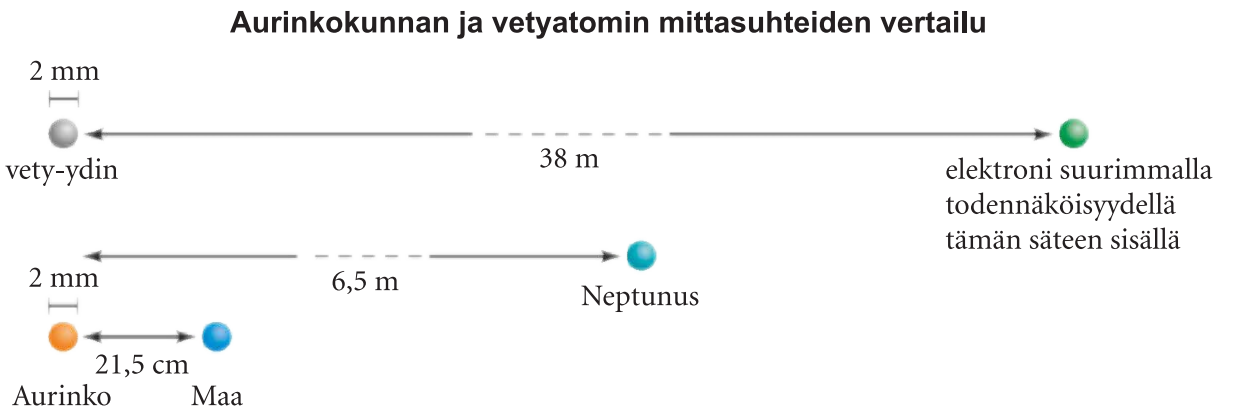
4.1 Ytimen rakenne

Edellisessä luvussa tarkasteltiin, miten atomin rakennetta on opittu ymmärtämään. Rutherfordin kokeiden perusteella voitiin päätellä, että atomi ei ole tasa-aineinen pallo, vaan sillä on ydin, jonka ympärillä elektronit ovat. Atomin ydin koostuu protoneista (p) ja neutroneista (n). Protoneja ja neutroneja kutsutaan yhteisellä nimellä **nukleoneiksi**. Protonin varaus on positiivinen ja sen suuruus on 1 e. Neutronilla ei ole varausta. Protonin ja neutronin massat ovat likimäärin yhtä suuret ja noin kaksi tuhatta kertaa elektronin massaa suurempia. Atomin massa on siis käytännöllisesti katsoen kokonaan sen ytimessä.

▲ **Vain runsas sata vuotta sitten ainoa keino tutkia ihmisruumista oli avata se. Röntgensäteilyn löytyminen antoi ensimmäisen mahdollisuuden kuvata kehon sisäosia ulkopuolelta, mutta röntgensäteet olivat myös vaarallisia eläville soluille. Ydinmagneettinen resonanssi (MRI) avasi uuden ja turvallisen kuvantamistekniikan. Tässä tekniikassa signaali otetaan vastaan suoraan atomien ytimestä.**



◀ **Atomi koostuu ytimestä ja sen ympärillä olevista elektroneista. Ydin puolestaan koostuu protoneista ja neutroneista. Protonit ja neutronit koostuvat edelleen kvarkeista.**



▲ Jos sekä Auringon että vety-ytimen halkaisija on 2 mm, silloin elektronit ovat todennäköisimmin pallon sisällä, jonka säde on noin 38 m. Vastaavasti jos Maa kiertäisi Aurinkoa 21,5 cm:n etäisyydellä, Neptunus olisi 6,5 m:n päässä. Kuvassa hiukkasten ja planeettojen koot eivät ole mittakaavassa.

Ydinvoima

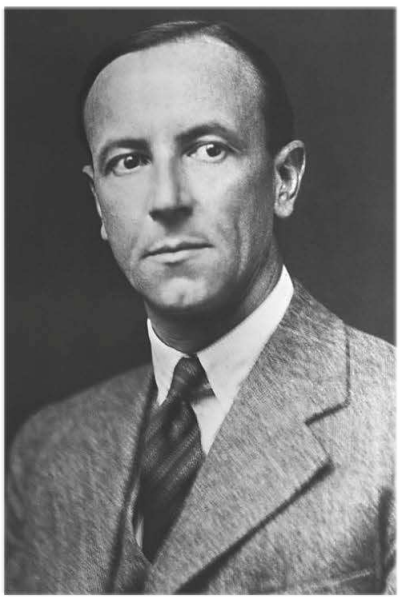
Ytimen protonit ovat keskenään sähköisessä vuorovaikutuksessa. Koska protonien varaukset ovat samanmerkkiset, ne hylkivät toisiaan. Sähköisen poistovoiman lisäksi protonien ja neutronien välillä vaikuttaa vetovoimana gravitaatiovoima. Gravitaatiovoima on kuitenkin niin pieni, ettei se pysty pitämään protoneja atomin ytimessä. Siksi protonien välillä on oltava jokin muu ydintä koossa pitävä vuorovaikutus. Tällä vuorovaikutuksella on vielä sellainen ominaisuus, että myös neutraalit neutronit tuntevat sen, jotta ne pysyvät ytimessä.

Nukleonien välillä vallitseva voima seuraa nukleonien rakenneosasten kvarkkien välisestä vahvasta vuorovaikutuksesta, (ks. luvut 7 ja 8). Kun tätä vuorovaikutusta ei vielä tunnettu, ytimien rakenneosien välistä voimaa kutsuttiin **ydinvoimaksi.**

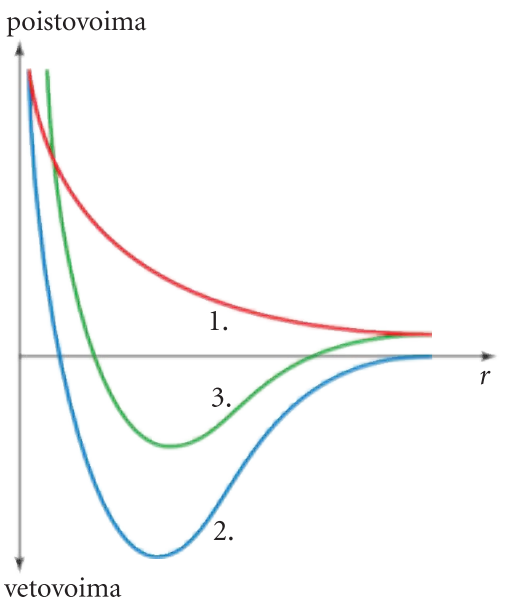
Ydinvoima vaikuttaa kaikkien protonien ja neutronien välillä yhtä suurena riippumatta nukleonin lajista. Ydinvoima on lyhyen kantaman voima, sillä se vaikuttaa vain noin 2 fm:n päähän.

Ytimen koossa pysyminen

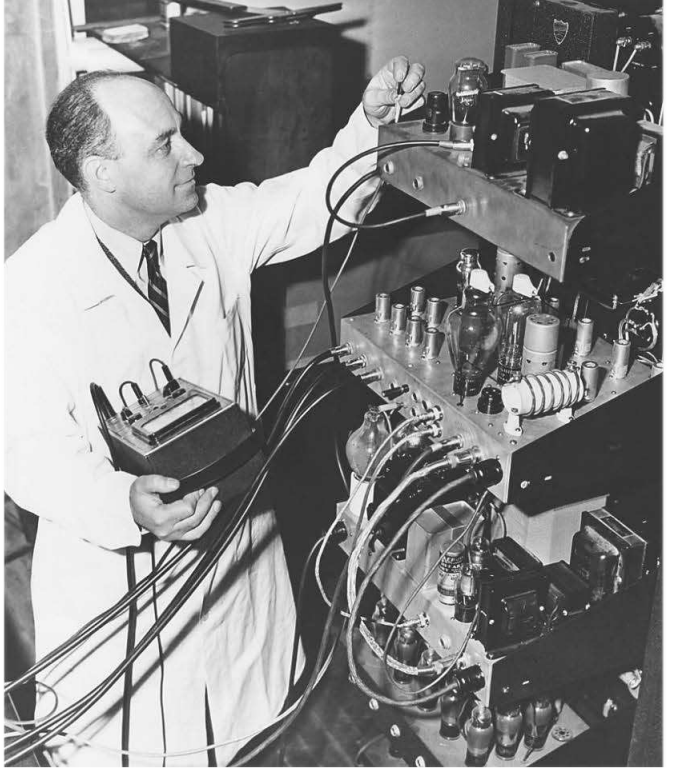
Ydin pysyy koossa, koska ytimen sisällä ydinvoima on voimakkaampi kuin protonien välinen sähköinen poistovoima.



▶ James Chadwick (1891–1974) löysi neutronin 1932. Hän sai tästä merkittävästä kokeellisesta saavutuksesta Nobelin fysiikan palkinnon 1935. Ennen Chadwickin löytöä fyysikot ajattelivat atomin koostuvan vain protoneista ja elektroneista.



▲ Protonien välistä voimaa esittää kuvaaja 3. Kuvaaja 1 esittää sähköistä voimaa ja kuvaaja 2 ydinvoimaa. Kuvaajan 3 arvot ovat kuvaajien 1 ja 2 arvojen summia.



▲ **Enrico Fermi (1901–1954) tutki ytimien ominaisuuksia kokeellisesti pommittamalla niitä neutroneilla. Hän pakeni Italian fasistihallintoa Yhdysvaltoihin, jossa hän jatkoi ytimen teoreettisia ja kokeellisia tutkimuksia. Hän sai Nobel-palkinnon 1938.**

Ydintä kuvaavat suureet

Atomin ytimen protonien lukumäärä on sen **järjestysluku** Z. Luonnossa esiintyvien alkuaineiden ydinten järjestysluvut ovat välillä $Z = 1$ (vety) ja $Z = 92$ (uraani). Ytimen neutronien lukumäärä on **neutroniluku** N, ja protonien ja neutronien yhteislukumäärä on **massaluku** A. Siten $A = Z + N$.

Alkuaineen tunnuksena käytetään sovittua merkkiä, esimerkiksi happi on O. Koska ytimen ominaisuudet riippuvat siitä, kuinka monta protonia ja neutronia ytimessä on, ydinfysiikassa ilmoitetaan ytimestä sekä sen järjestysluku että massaluku. Tällöin alkuaineen X ydintä merkitään ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. Esimerkiksi ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ esittää happiatomin ydintä, jossa on 8 protonia ja $16 - 8 = 8$ neutronia. Usein järjestysluku jätetään merkinnästä pois, koska alkuaineen kemiallinen merkki ilmaisee sen. Esimerkiksi rautaatomin ydintä, jonka massaluku on 56, voidaan merkitä joko ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ tai ${}^{56}\mathrm{Fe}$. Kun neutroniluku halutaan myös näkyviin, käytetään merkintää ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}$, esimerkiksi ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}_{30}$. Toisinaan massaluku merkitään kemiallisen tunnuksen perään, esimerkiksi Fe-56. Atomiydintä, jolla on tietty järjestysluku ja neutroniluku, kutsutaan **nukliksi**. Nuklidi on siis ydinlaji.

Ytimen tunnus

Ydintä ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ kuvaavat suureet
Z on järjestysluku, protonien lukumäärä ytimessä
N on neutronien lukumäärä ytimessä
A on massaluku
$A = Z + N$.

Nuklidi

Nuklidi on ydinlaji, jolla on tietty määrä protoneja ja neutroneja.

Atomin koko on tyypillisesti luokkaa 10^{-10} m. Ydin on huomattavasti pienempi kuin atomi, sillä ytimen säde on suuruusluokkaa 10^{-14} m. Jos atomin ydintä mallinnetaan pallolla, pallon säde noudattaa melko tarkasti lauseketta

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}},$$

jossa $r_0 = 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m ja A on massaluku.

Koska pallon tilavuus V on suoraanverrannollinen säteen r kuutioon eli $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, ytimen tilavuus on verrannollinen sen massalukuun

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi (r_0 A^{\frac{1}{3}})^3 = \frac{4}{3}\pi r_0{}^3 A\,.$$

Esimerkki 1

Kuinka suuri on rautaytimen ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ säde?

Ratkaisu

Rautaytimen ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ massaluku on $A = 56$.
Soveltamalla mallia $r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$,
jossa $r_0 = 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m, saadaan ytimen säteeksi

$$\begin{aligned} r &= r_0 A^{\frac{1}{3}} \\ &= 1{,}4 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} \cdot 56^{\frac{1}{3}} \\ &= 5{,}3562 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} \approx 5{,}4 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m}. \end{aligned}$$

Vastaus

Rautaytimen ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ säde on $5{,}4 \cdot 10^{-15}$ m.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5

4.2 Isotoopit

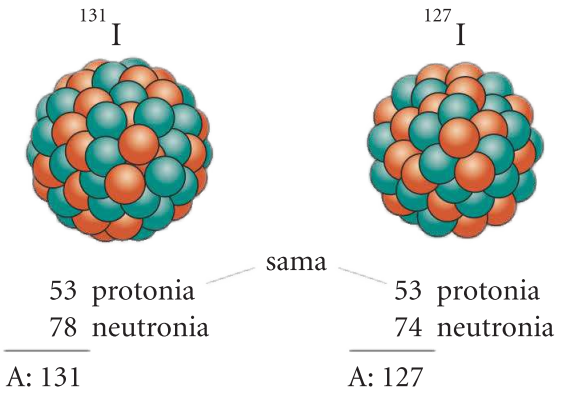
Saman alkuaineen atomin ytimessä on aina sama määrä protoneja, mutta ytimen neutronimäärä voi vaihdella. Näitä neutroniluvultaan toisistaan poikkeavia saman alkuaineen atomeja kutsutaan kyseisen alkuaineen **isotoopeiksi**.

Isotooppi

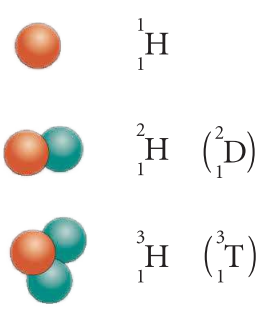
Saman alkuaineen atomit, joiden ytimissä on eri määrä neutroneja, ovat tämän alkuaineen isotoopeja.

Monilla alkuaineilla on vain yksi tai muutama pysyvä isotooppi. Muut isotoopit ovat pysymättömiä ja ne hajoavat radioaktiivisesti. Raskailla alkuaineilla on useita isotooppeja, mutta niille ei ole annettu erityisnimiä. Esimerkiksi lyijyllä tunnetaan 29 isotooppia. Isotooppien ominaisuudet löytyvät taulukoista tai isotooppikartoista (nuklidikartasta). Malli nuklidikartasta on kirjan lopussa.

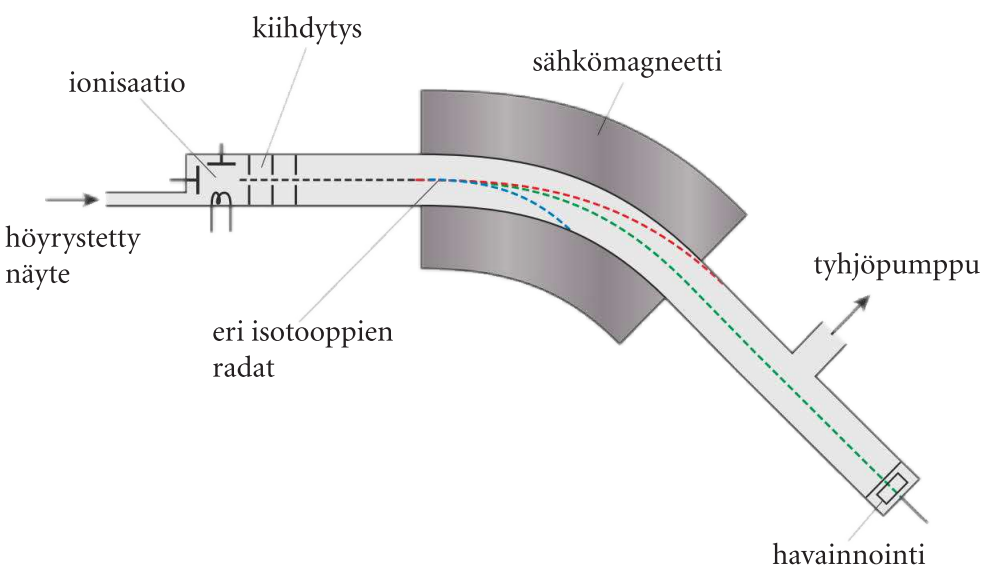
Vedyllä on kolme isotooppia ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ ja ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$. Jokaisessa isotoopissa on yksi elektroni ytimen ympärillä. Isotooppi ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ on tavallinen vety, jonka ytimessä on yksi protoni eikä lainkaan neutroneja. Tämän isotoopin suhteellinen osuus maapallon vedystä on 99,985 %. Isotooppia ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ kutsutaan deuteriumiksi ja merkitään usein ${}^{2}_{1}\mathrm{D}$. Sen ytimessä on yksi protoni ja yksi neutroni. Sen suhteellinen osuus vetyatomeista on 0,015 %. Deuteriumia saadaan kaupallisesti yhdisteenä $\mathrm{D_2O}$. Kolmatta isotooppia ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ kutsutaan tritiumiksi (${}^{3}_{1}\mathrm{T}$). Sen ytimessä on protoni ja kaksi neutronia. Tritium on radioaktiivinen, eikä sitä esiinny luonnossa pysyvänä. Sitä on jonkin verran esimerkiksi ydinvoimaloiden lauhdevedessä.



▲ **Jodin isotooppien I-131 ja I-127 ytimet.**



◀ **Vedyn isotooppien ytimet.**



Alkuaineiden kemialliset ominaisuudet eivät riipu atomin ytimen rakenteesta, vaan sen elektronien jakautumisesta ytimen ympärille. Siksi isotooppien kemialliset ominaisuudet ovat samanlaiset. Niitä ei voida erottaa kemiallisesti. Koska isotooppien massat ovat erilaisia, saman alkuaineen isotoopit voidaan erottaa esimerkiksi massaspektrometrillä. Massaspektrometrin toiminta on kuvattu Physica 7 -kirjan sivulla 63.

Luonnossa esiintyvät alkuaineet ovat yleensä aineen useampien isotooppien seoksia, ja tietyn alkuaineen eri näytteissä isotooppien osuus on sama. Jaksollisessa järjestelmässä ilmoitettu atomimassa on niin sanottu suhteellinen atomimassa, joka on näytteen atomien isotooppien massojen painotettu keskiarvo. Painonkerroin on isotoopin atomien osuus näytteen kaikista atomeista.

◀ **Isotooppien kemialliset ominaisuudet ovat samanlaiset, joten niitä ei voida erottaa kemiallisesti. Koska isotooppien massat ovat erilaisia, saman alkuaineen isotoopit voidaan erottaa esimerkiksi massaspektrometrillä.**

Atomimassayksikkö

Koska atomien massat ovat pieniä, suuruusluokkaa 10^{-27} kg, on käytännöllistä käyttää muuta massan yksikköä kuin kilogramma. Siksi atomien massat ilmoitetaan usein atomimassayksikön avulla.

Atomimassayksikkö u on määritelty siten, että hiilen yleisimmän isotoopin ^{12}C atomin massaksi on sovittu tasan 12 u, siis $m_C = 12$ u.

Ainemäärän yksikkö mooli on määritelty niin, että 12 g hiili ^{12}C:tä sisältää moolin eli Avogadron luvun $N_A = 6{,}0221367 \cdot 10^{23}$ ilmoittaman määrän hiiliatomeja. Siten yhden hiiliatomin massa on

$$m_C = \frac{12\ \text{g}}{N_A}.$$

Edellä hiiliatomin massa lausuttiin kahdella tavalla ($m_C = 12$ u ja $m_C \frac{12\ \text{g}}{N_A}$). Näistä saadaan yhtälö

$$12\ \text{u} = \frac{12\ \text{g}}{N_A}.$$

Tästä saadaan

$$1\ \text{u} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12\ \text{g}}{N_A}$$
$$= \frac{1}{12} \cdot \frac{12\ \text{g}}{6{,}022 \cdot 10^{23}}$$
$$= 1{,}6606 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}.$$

Taulukkokirjoissa atomimassayksikölle annetaan tarkempi arvo, jota kannattaa käyttää ydinfysiikan laskuissa.

Atomimassayksikkö

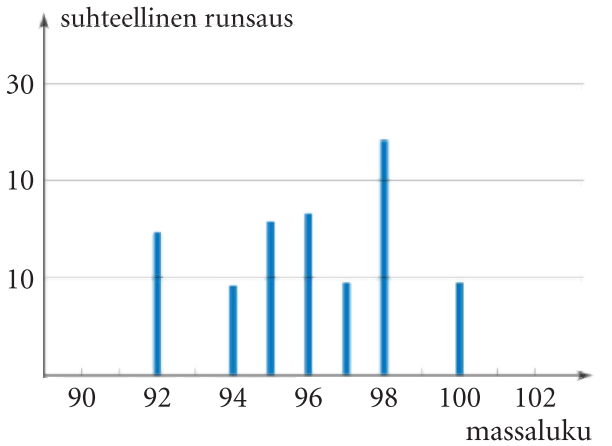
$1\ \text{u} = 1{,}6605655 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$

Elektronin ja nukleonien massat

Elektronin massa
$m_e = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$
$= 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \text{u}$

Protonin massa
$m_p = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$
$= 1{,}0072765\ \text{u}$

Neutronin massa
$m_n = 1{,}6749286 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$
$= 1{,}0086650\ \text{u}$



▲ Kuvassa on molybdeenin massaspektri, jossa on esitetty eri isotooppien suhteelliset määrät. Vaaka-akselina on isotoopin massaluku. Kuvasta nähdään, että yleisimmällä isotoopilla massaluku on 98. Mittauksen mukaan molybdeenilla on seitsemän isotooppia. Muiden isotooppien massaluvut ovat 92, 94, 95, 96, 97 ja 100.

Tehtäviä ➢ 6, 7, 8, 9

4.3 Massavaje ja sidosenergia

Hiiliatomin ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ ytimessä on kuusi protonia ja kuusi neutronia, joiden yhteenlaskettu massa on

$$\begin{aligned} m &= 6m_\mathrm{p} + 6m_\mathrm{n} \\ &= 6 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 6 \cdot 1{,}0086650\ \mathrm{u} \\ &= 12{,}0956490\ \mathrm{u}. \end{aligned}$$

Hiiliatomin ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ massa on määritelmän mukaan tasan 12 u. Koska elektronin massa on $m_\mathrm{e} = 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u}$ ja hiiliatomissa on 6 elektronia, hiiliytimen massa saadaan vähentämällä hiiliatomin massasta elektronien massat.

Siten hiiliatomin ytimen massaksi saadaan 11,9967085 u. Hiiliatomin ytimen rakenneosien yhteismassa on siis suurempi kuin niistä muodostuvan ytimen massa. Hiiliatomin ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ ytimen rakenneosien yhteismassan ja ytimen massan massaero on

$$\begin{aligned} \Delta m &= 12{,}0956490\ \mathrm{u} - 11{,}9967085\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}0989405\ \mathrm{u}. \end{aligned}$$

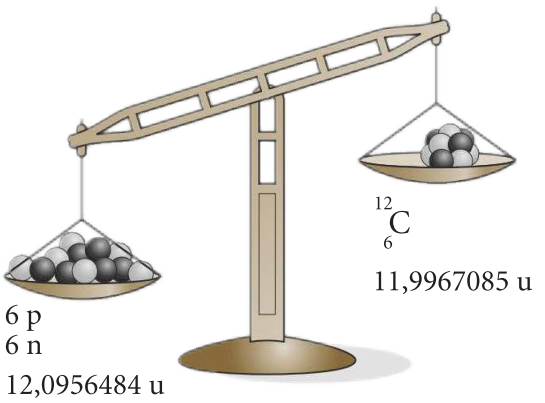
Koska

$$1\ \mathrm{u} = 1{,}6605655 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg},$$

massaero on

$$\begin{aligned} \Delta m &= 0{,}0989405 \cdot 1{,}6605655 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \\ &= 0{,}1642972 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}. \end{aligned}$$

Elektronin massa on $m_\mathrm{e} = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$, joten massavaje on noin kaksisataa kertaa elektronin massa.



▲ **Hiiliatomin ytimen massa on pienempi kuin sen rakenneosasten yhteinen massa.**

Edellinen hiiliatomin ydintä koskeva tulos voidaan yleistää koskemaan kaikkia ytimiä. **Atomin ytimen massa on aina pienempi kuin sen muodostavien protonien ja neutronien yhteismassa.** Atomin ytimen **massavaje** Δm on ytimen rakenneosien yhteismassan ja ytimen massan välinen erotus. Ytimessä ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ on Z protonia ja $N\ (= A - Z)$ neutronia. Jos ytimen massa on m_ydin, ytimen ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ massavaje on tällöin

$$\Delta m = Zm_\mathrm{p} + Nm_\mathrm{n} - m_\mathrm{ydin},$$

jossa m_p on protonin massa ja m_n neutronin massa.

Atomin ytimen massaa ei voi suoraan mitata, joten taulukkokirjoissa annetaan ytimien massojen sijasta kokonaisten atomien massat. Massavajetta laskettaessa ytimen massa saadaan vähentämällä atomin massasta elektronien massat

$$\begin{aligned} \Delta m &= Zm_\mathrm{p} + Nm_\mathrm{n} - (m_\mathrm{atomi} - Zm_\mathrm{e}) \\ &= Zm_\mathrm{p} + Nm_\mathrm{n} + Zm_e - m_\mathrm{atomi}. \end{aligned}$$

Ytimen massavaje

$\Delta m = Zm_\mathrm{p} + Nm_\mathrm{n} + Zm_\mathrm{e} - m_\mathrm{atomi}$,
jossa

Z	on ytimen järjestysluku (protonien lukumäärä),
N	on neutroniluku,
m_p	on protonin massa,
m_e	on elektronin massa,
m_n	on neutronin massa ja
m_atomi	on atomin massa.

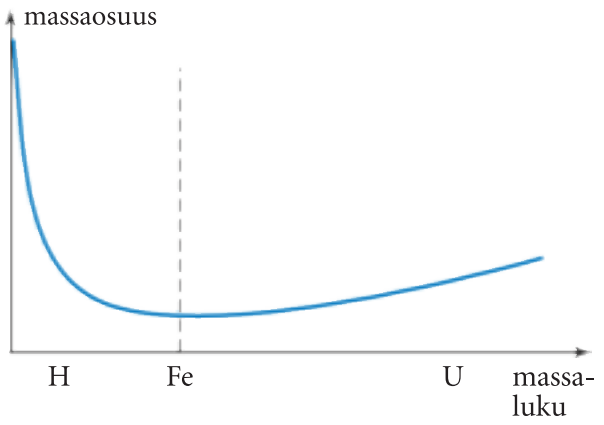
Huom.
Massavajeen laskemiseen tarvittava atomin massa luetaan isotooppitaulukosta. Jaksollisessa järjestelmässä ja alkuainetaulukossa olevat massat ovat alkuaineen suhteellisia atomimassoja, eikä niitä voi käyttää massavajeen laskemiseen.

Tarkastellaan vielä massavajetta laskemalla ytimen massa nukleonia kohden (m_{ydin}/A). Taulukkokirjasta löytyvien atomien massoista saadaan ytimien massat vähentämällä atomien massoista järjestysluvun osoittama määrä elektronien massoja.

Lasketaan muutamien ytimien massa ytimessä olevia nukleoneja kohti eli **massaosuus.**

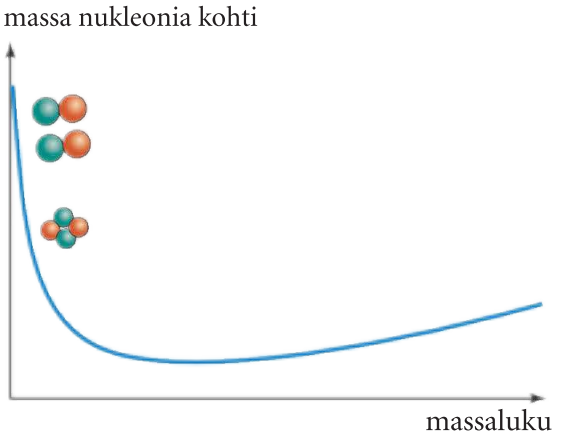
	A	m_{ydin} (u)	$\frac{m_{ydin}}{A}$ (u)
^{1}H	1	1,0072765	1,00728
^{4}He	4	4,0015061	1,00038
^{12}C	12	11,996709	0,99973
^{56}Fe	56	55,920676	0,99858
^{238}U	238	238,00031	1,00000

Kun massa nukleonia kohti lasketaan useille ytimille, saatavat arvot asettuvat massaluvun funktiona koordinaatistoon (alla olevan) kuvaajan mukaisesti.

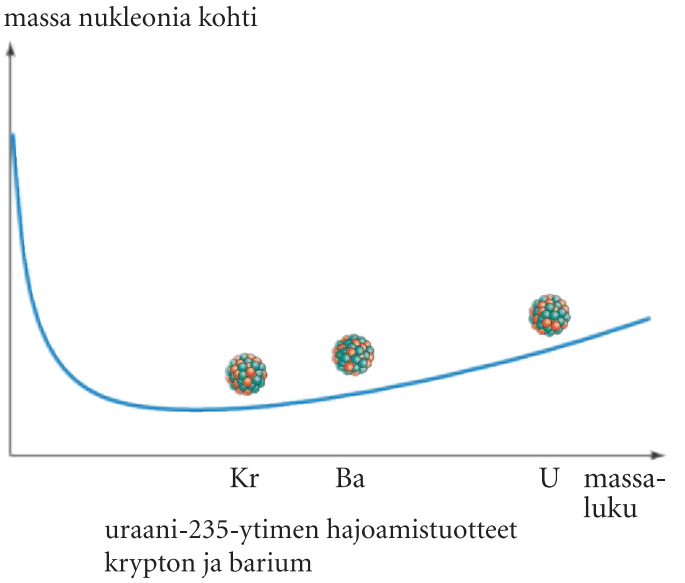


▲ **Ydinten massa jaettuna nukleonien määrällä.**

Taulukosta ja kuvaajasta huomataan, että massaosuus on pienin raudalla Fe. Ydinmuutosten luonnollinen suunta on sellainen, että syntyville ytimille massaosuus on mahdollisimman pieni. Siksi kevyet ytimet liittyvät yhteen (fuusio) ja raskaat ytimet hajoavat keskiraskaiksi (fissio).

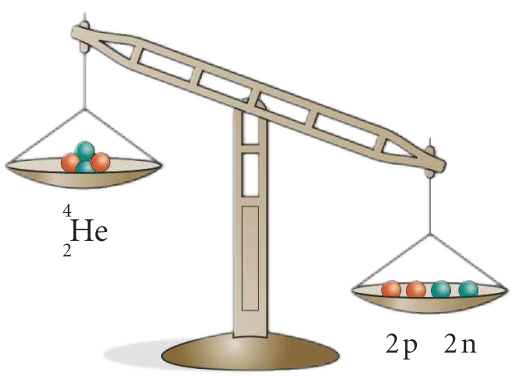


▲ **^{2}H-ytimessä massa yhtä nukleonia kohden on suurempi kuin ^{4}He-ytimessä.**

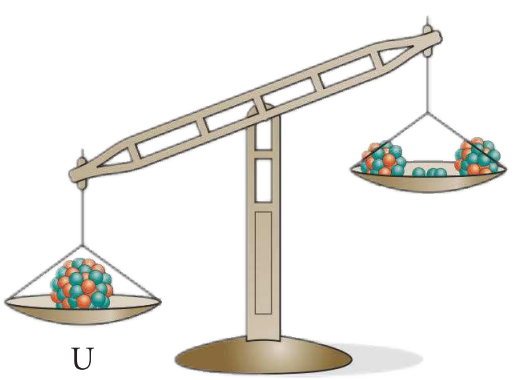


uraani-235-ytimen hajoamistuotteet krypton ja barium

▲ **^{235}U-ytimessä massa yhtä nukleonia kohden on suurempi kuin hajoamistuotteissa.**



▲ **Kaksi protonia ja kaksi neutronia ovat yhteensä massiivisempia kuin heliumatomin ydin.**



▲ **Uraaniatomin ydin on massiivisempi kuin sen hajoamistuotteet yhteensä.**

Massa ja energia

Suppean suhteellisuusteorian mukaan massalla ja energialla on vastaavuus. Einsteinin mukaan systeemillä on sisäinen energia. Jos ytimen massa muuttuu esimerkiksi radioaktiivisessa hajoamisessa määrällä Δm, vapautuu energiaa määrä $E = \Delta m c^2$.

Massan ja energian vastaavuus

$E = mc^2$,
jossa
m on massa ja
c on valon nopeus tyhjiössä.

Koska ydinhiukkasten ja ytimien massat ilmoitetaan usein atomimassayksikön avulla, lasketaan, kuinka suuri on atomimassayksikköä vastaava energia. Atomimassayksikkö on kilogrammoina

$$1\ \mathrm{u} = 1{,}6605655 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

ja valon nopeus on

$$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s}.$$

Siten

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= 1{,}6605655 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \cdot (2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s})^2 \\ &= 149{,}2442\ 10^{-12}\ \mathrm{J}. \end{aligned}$$

Atomin ja sen ytimen energioiden käsittelemiseen sopivan kokoinen yksikkö on elektronivoltti. Koska $1\ \mathrm{eV} = 0{,}16021774\ \mathrm{aJ}$, atomimassayksikköä vastaava energia elektronivoltteina on

$$\begin{aligned} E &= \frac{149{,}2442 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{J}}{0{,}16021773 \cdot 10^{-18}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{eV}}} \\ &= 931{,}5085\ \mathrm{MeV} \approx 931{,}5\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

Siis $mc^2 = 931{,}5\ \mathrm{MeV}$, kun $m = 1\ \mathrm{u}$.

Atomimassayksikön energiaekvivalentti

$$1\ \mathrm{u} = 931{,}5\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{c}^2}.$$

Valonnopeuden neliö voidaan siten esittää atomimassayksikön ja energian yksikön avulla.

Valonnopeuden neliö

$$c^2 = 931{,}5\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}}.$$

Sidosenergia ja sidososuus

Edellä havaittiin, että ytimen rakenneosien massa on suurempi kuin ytimen massa. Tätä massavajetta vastaavaa energiaa kutsutaan ytimen **sidosenergiaksi**. Sidosenergia ei ole energiaa, joka ytimellä on sidoksissa. Vaan se on energiaa, joka on luovutettu ympäristöön ytimen muodostuessa.

Ytimen sidosenergia

Ytimen sidosenergia E_B on energia, joka tarvittaisiin hajottamaan ydin nukleoniksi (protoneiksi ja neutroneiksi). Sama energia vapautuu, jos ydin muodostuisi nukleoneistaan.

Sidososuus

Sidososuus b on ytimen sidosenergia yhtä nukleonia kohden eli

$$b = \frac{E_\mathrm{B}}{A}.$$

Ytimen hajottamiseen tarvittava energia, sidosenergia, saadaan selville, kun lasketaan yhtälön $E = mc^2$ mukaisesti ytimen massavajeen ja energian vastaavuus. Ytimen **sidosenergia** on sen massavajetta Δm vastaava energia, $E = \Delta m c^2$.

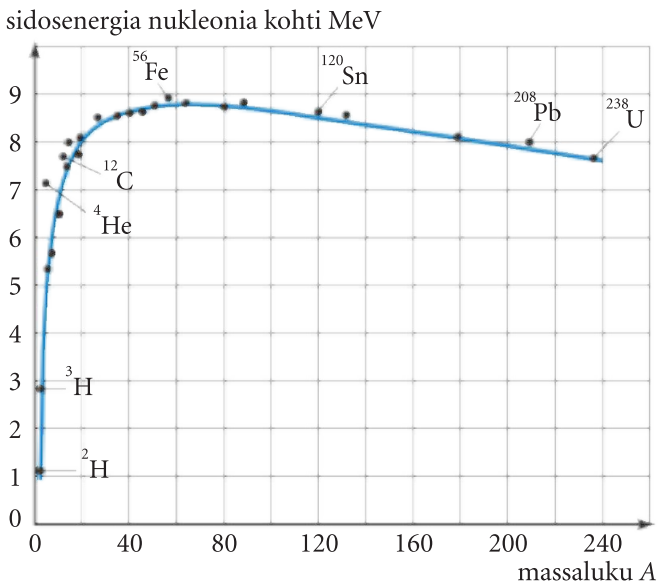
Kun käytetään massavajeen lauseketta, sidosenergia voidaan laskea nukleonien massojen avulla.

Ytimen sidosenergia

$E_\mathrm{B} = (Zm_\mathrm{p} + Zm_\mathrm{e} + Nm_\mathrm{n} - m_\mathrm{atomi})c^2$,
jossa
Z on ytimen järjestysluku,
N on neutroniluku,
m_p on protonin massa,
m_e on elektronin massa,
m_n on neutronin massa,
m_atomi on atomin massa ja
c on valonnopeus.

Sidososuus kasvaa atomin massaluvun kasvaessa rautaan Fe saakka ja pienenee siitä eteenpäin. Hiiliytimen sidososuus on 7,7 MeV, ja raskaan uraanin $^{235}_{92}\mathrm{U}$ ytimen sidososuus on 7,59 MeV. Keskiraskaiden ytimien sidososuudet (esimerkiksi cesium 8,38 MeV ja zirkonium 8,67 MeV) ovat suurempia kuin keveiden ja raskaiden ytimien sidososuudet.

Piirretään kuvaaja keskimääräinen sidososuus massaluvun funktiona.



▲ **Keskimääräinen sidososuus massaluvun funktiona.**

Hiiliytimen hajottamiseen tarvitaan 7,7 MeV nukleonia kohden. Sen sijaan cesiumydintä on vaikeampi hajottaa, kun sen hajottamiseen tarvitaan 8,4 MeV kutakin rakenneosasta kohden. Keskiraskaissa ytimissä nukleonit ovat kaikkein tiukimmin ytimeen sidottuja. Energiaa vapautuu sekä raskaiden ydinten hajotessa (fissio) että keveiden ydinten yhtyessä (fuusio).

Esimerkki 1

a) Kuinka suuri on hiili-12-ytimen sidosenergia, kun tiedetään, että sen massavaje on 0,0989405 u?

b) Kuinka suuri on hiili-12-ytimen sidososuus?

Ratkaisu

a) Massavajetta vastaa energia

$$\begin{aligned} E &= \Delta m c^2 \\ &= 0{,}0989405\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}0989405 \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV} \\ &= 92{,}1631\ \mathrm{MeV} \approx 92\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

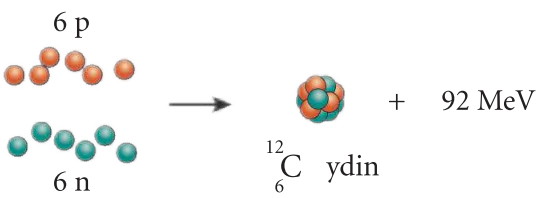
b) Sidososuus on

$$\begin{aligned} b &= \frac{E_\mathrm{B}}{A} \\ &= \frac{92{,}1631\ \mathrm{MeV}}{12} \\ &= 7{,}6803\ \mathrm{MeV} \approx 7{,}7\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

Vastaus

a) Sidosenergia on 92 MeV.

b) Sidososuus on 7,7 MeV.



▲ **Kun hiiliydin muodostuu rakenneosista, vapautuu energiaa. Sama määrä energiaa tarvitaan hajottamaan ydin takaisin rakenneosasiksi, erillisiksi protoneiksi ja neutroneiksi. Tätä energiaa kutsutaan ytimen sidosenergiaksi.**

Esimerkki 2

Uraani $^{235}_{92}\mathrm{U}$ hajoaa cesium $^{140}_{58}\mathrm{Ce}$ ja zirkonium $^{94}_{40}\mathrm{Zr}$ -ytimiksi. Vertaa ytimien sidososuuksia.

Ratkaisu

Uraanin järjestysluku $Z = 92$, ja neutroniluku
$N = A - Z = 235 - 92 = 143$.

Taulukkokirjan mukaan uraani-isotoopin $^{235}\mathrm{U}$ massa on 235,043925 u.

Uraanin sidosenergia on

$$\begin{aligned} E_\mathrm{B} &= (Zm_\mathrm{p} + Zm_\mathrm{e} + Nm_\mathrm{n} - m_\mathrm{atomi})c^2 \\ &= (92 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} \\ &\quad + 92 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} \\ &\quad + 143 \cdot 1{,}0086650\ \mathrm{u} - 235{,}043925\ \mathrm{u})c^2 \\ &= 1{,}9150773508\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 1{,}9150773508 \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV} \\ &= 1783{,}8946\ \mathrm{MeV} \approx 1\,784\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

Sidososuus on

$$b = \frac{E_\mathrm{B}}{\mathrm{A}} = \frac{1783{,}8946\ \mathrm{MeV}}{235} = 7{,}5910\ \mathrm{MeV} \approx 7{,}59\ \mathrm{MeV}.$$

Cesiumin $^{140}_{58}\mathrm{Ce}$ järjestysluku $Z = 58$, neutroniluku
$N = A - Z = 140 - 58 = 82$,
isotoopin massa $m = 139{,}905433$ u.

Cesiumin sidosenergia on

$$\begin{aligned} E_\mathrm{B} &= (Zm_\mathrm{p} + Zm_\mathrm{e} + Nm_\mathrm{n} - m_\mathrm{atomi})c^2 \\ &= (58 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 58 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} \\ &\quad + 82 \cdot 1{,}0086649\ \mathrm{u} - 139{,}905433\ \mathrm{u})c^2 \\ &= 1{,}2589434342\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 1{,}2589434342 \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV} \\ &= 1172{,}7058\ \mathrm{MeV} \approx 1\,173\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

Sidososuus on

$$b = \frac{E_\mathrm{B}}{\mathrm{A}} = \frac{1172{,}7058\ \mathrm{MeV}}{140} = 8{,}3765\ \mathrm{MeV} \approx 8{,}38\ \mathrm{MeV}.$$

Zirkoniumin $^{94}_{40}\mathrm{Zr}$ järjestysluku $Z = 40$, neutroniluku
$N = 94 - 40 = 54$,
ja isotoopin massa $m = 93{,}906314$ u.

Sidosenergia on

$$\begin{aligned} E_\mathrm{B} &= (Zm_\mathrm{p} + Zm_\mathrm{e} + Nm_\mathrm{n} - m_\mathrm{atomi})c^2 \\ &= (40 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 40 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} \\ &\quad + 54 \cdot 1{,}0086649\ \mathrm{u} - 93{,}906314\ \mathrm{u})c^2 \\ &= 0{,}874593796\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}874593796 \cdot c^2 \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV}/c^2 \\ &= 814{,}6841\ \mathrm{MeV} \approx 815\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

Sidososuus on

$$b = \frac{E_\mathrm{B}}{\mathrm{A}} = \frac{814{,}6841\ \mathrm{MeV}}{94} = 8{,}6669\ \mathrm{MeV} \approx 8{,}67\ \mathrm{MeV}.$$

Vastaus

Raskaan uraanin $^{235}_{92}\mathrm{U}$ ytimen sidososuus on (7,59 MeV). Keskiraskaiden hajoamistuotteiden sidososuudet (8,38 MeV ja 8,67 MeV) ovat suurempia kuin uraanin. Hajoamisreaktio tapahtuu sellaiseen suuntaan, jossa sidososuus kasvaa.

Esimerkki 3

Kuinka suuri massan muutos vastaa energiaa, jonka natriumatomi luovuttaa emittoidessaan fotonin? Fotonin aallonpituus on 300 nm.

Ratkaisu

Planckin kaavan mukaan fotonia vastaa energia

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}.$$

Tätä energiaa vastaava massan muutos saadaan lausekkeesta

$$E = \Delta m c^2$$

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{hc}{c^2\lambda} = \frac{h}{c\lambda}$$

$$= \frac{6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{2{,}9979 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 300 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}$$

$$= 7{,}36746 \cdot 10^{-36}\ \text{kg} \approx 7{,}4 \cdot 10^{-36}\ \text{kg}.$$

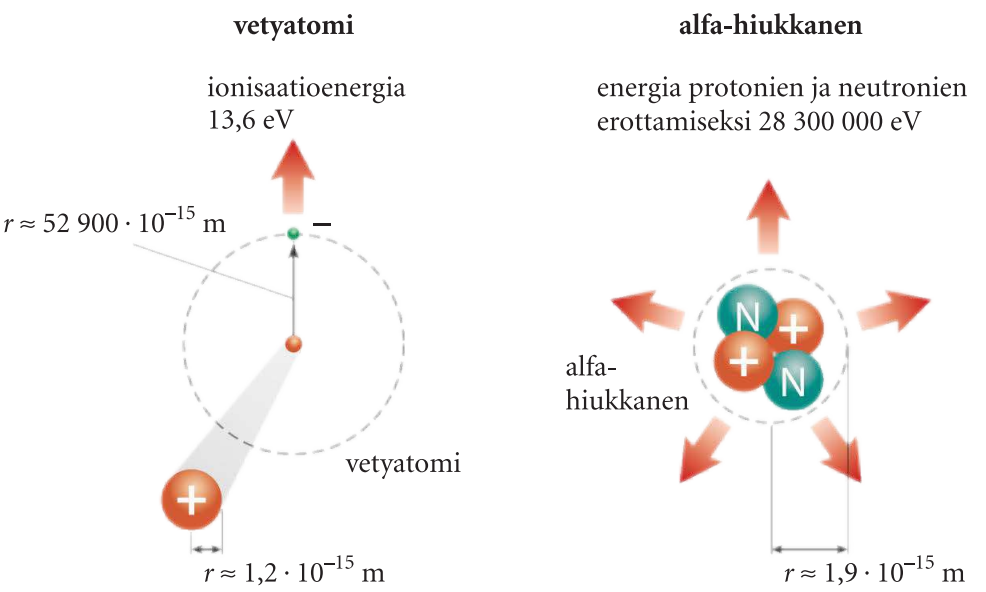
Vastaus

Natriumatomin massan muutos on $7{,}4 \cdot 10^{-36}$ kg.

Huom.

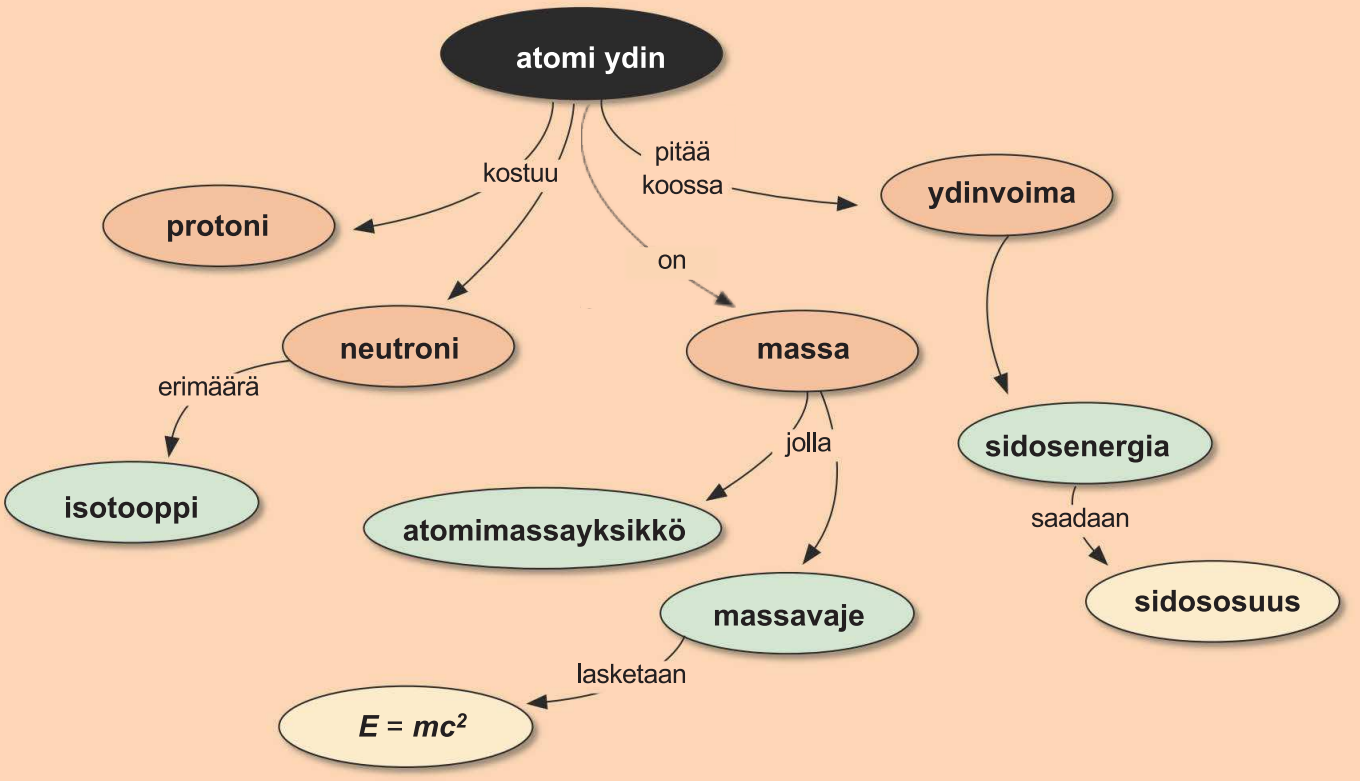
Massan muutos on todellinen, mutta sitä ei voida havaita, koska se on niin pieni.

Elektronin massa on $m_e = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}$ kg, joten emissioon liittyvä massan muutos on noin sadastuhannesosa elektronin massasta. Massan muutosta ei siis tarvitse ottaa huomioon kemiallisissa reaktioissa.



▲ **Ytimen hajottaminen vaatii huomattavasti enemmän energiaa kuin atominionisaatio.**

YHTEENVETO



Tehtäviä ➢ 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- nukleoni
- isotooppi
- atomimassayksikkö
- energian ja massan yhteys
- massavaje
- sidosenergia, sidososuus

4.1

1. Kirjoita
a) Ba-137-ytimen
b) Ra-226-ytimen
tunnus muodossa ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}$.

2. Ydintä kuvaavat suureet ovat
a) $A = 44$ ja $Z = 20$ ja
b) $A = 112$ ja $Z = 50$.

Kirjoita ytimen täydellinen tunnus muodossa ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}$.

3. Lyijykappale ja happikaasu ilmassa ovat tiheydeltään hyvin erilaiset. Minkälaiset ovat niiden ytimien tiheydet toisiinsa verrattuna?

4. Kuinka suuri ytimen tiheys on?

5. Kahden protonin välimatka ytimessä on 2 fm. Laske protonien välisen
a) sähköisen voiman
b) gravitaatiovoiman suuruus.

4.2

6. Miten määritellään
atomimassayksikkö 1 u?

7. **a)** Mitä ovat isotoopit?
b) Käytä taulukkokirjaa ja kuvaile joitakin isotooppeja.
c) Tutki nuklidikartasta uraanin ja thoriumin isotooppeja.

8. Luonnossa esiintyvä happi on kolmen isotoopin seos. Isotooppien massaluvut ovat 16, 17 ja 18. Ilmoita näiden isotooppien järjestysluvut ja neutroniluvut.

9. Aineesta tiedetään, että se on lyijyn isotooppi, mutta ei tiedetä, mikä isotooppi. Voidaanko tästä tiedosta päätellä
a) järjestysluku
b) neutroniluku
c) massaluku?

4.3

10. Laske deuterium-ytimen massavaje. Vetyatomin massa on 1,0078250 u, deuteriumin massa 2,0141018 u ja neutronin massa 1,008664891 u.

11. Laske
a) happi-16-ytimen
b) lyijy-208-ytimen
massavaje.

12. Oppikirjan massa on noin 150 g. Kuvitellaan, että kirjan koko massa voitaisiin muuttaa energiaksi. Kuinka pitkään voisi tällä energialla lämmittää taloa, jonka lämmityslaitteen teho on 10 000 W?

13. Käytä hyväksesi sidososuuskuvaajaa sivulla 78 ja järjestä ${}^{31}_{15}\mathrm{P}$, ${}^{59}_{27}\mathrm{Co}$, ${}^{184}_{74}\mathrm{W}$, ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$ ytimet sidososuuden mukaiseen järjestykseen pienimmästä suurimpaan.

14. Miten määritellään
a) ytimen sidosenergia
b) sidososuus?

15. Nuklidin ${}^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ sidosenergia on 160,64 MeV. Kuinka suuri sen sidososuus on?

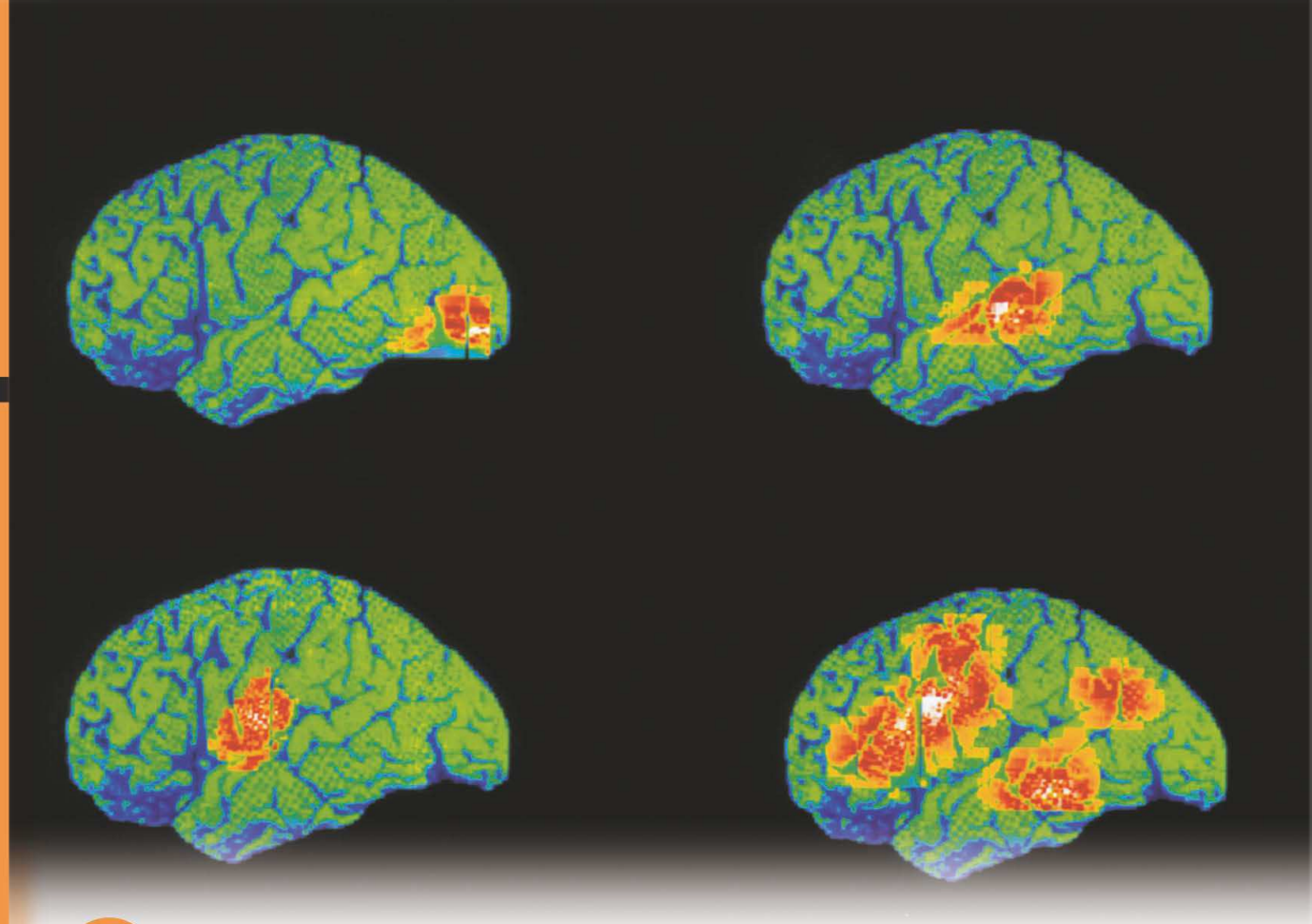
16. Laske ytimen ${}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$ sidosenergia ja sidososuus.

5

Radioaktiivisuus

Kaikki ytimet eivät ole pysyviä. Osa alkuaineiden ytimistä on sellaisia, että ne voivat hajota itsestään. Niitä sanotaan radioaktiivisiksi ytimiksi. Radioaktiivisuutta käytetään monissa tekniikan ja lääketieteen sovelluksissa ja mittalaitteissa.

Tässä luvussa tarkastellaan ytimen radioaktiivisuutta, säteilyn mittaamista ja säteilyyn liittyviä suureita sekä niiden yksiköitä.



5.1 Radioaktiivisen aineen ydin lähettää säteilyä

Erilaisia ydinlajeja, nuklideja, tunnetaan yli 3 100, joista alle 300 on stabiileja eli pysyviä. Epästabiili atomiydin voi hajota itsestään eli spontaanisti, jolloin ytimestä poistuu joko alfahiukkasia, beetahiukkasia, neutroneita tai gammasäteilyä. Tätä sanotaan **radioaktiiviseksi hajoamiseksi**. Spontaanissa hajoamisessa vapautuu energiaa, ja hajoamistuotteiden sidosenergia on suurempi kuin lähtöytimien sidosenergia. Koska radioaktiivisen aineen lähettämä säteily on peräisin ytimestä, säteilyn eri lajeja kutsutaan myös **ydinsäteilyksi**.

Suurin osa radioaktiivisista ytimistä on alfa- tai beeta-aktiivisia, eli ne lähettävät joko alfasäteilyä tai beetasäteilyä. Sen lisäksi kaikki radioaktiiviset aineet lähettävät gammasäteilyä.

Alfa- ja beetasäteily koostuvat varatuista hiukkasista. Ne ionisoivat väliaineen atomeja, joita säteily kohtaa. Gammasäteily on hyvin lyhytaaltoista ja suurienergiaista sähkömagneettista säteilyä, joten myös se pystyy ionisoimaan atomeja.

▲ Isotooppitutkimukset perustuvat gammasäteilyn mittaamiseen. Gammasäteilyä syntyy joko ytimen viritystilojen purkautumisissa tai beetahajoamisessa syntyneen positronin törmätessä elektroniin. Positronikuvauslaitteiston (PET) gammakamera kiertää potilaan ympäri ja poikkileikkauskuva muodostetaan tietokoneen avulla. Värjätyt PET-kuvat esittävät, mitkä osat aivoista aktivoituvat, kun ihminen katsoo, kuuntelee, puhuu ja ajattelee.

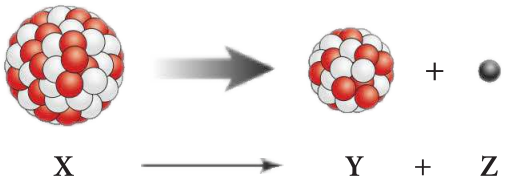
Ydinsäteily

Radioaktiivinen ydin voi lähettää hajotessaan joko alfa- (α), beeta- (β) tai gammasäteilyä (γ).

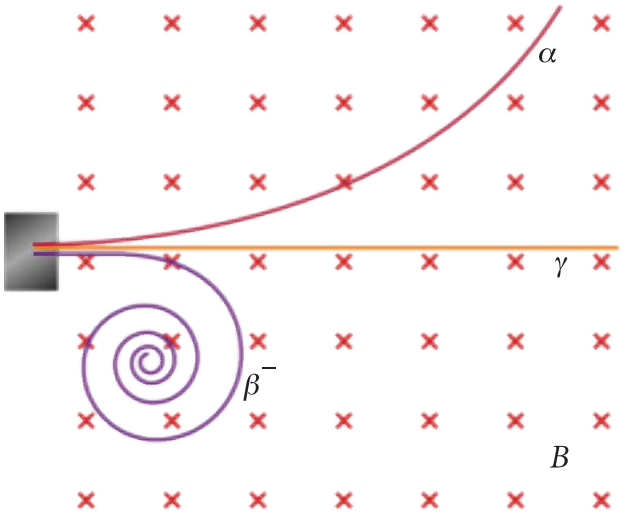
Ydinsäteily on ionisoivaa ja aiheuttaa kemiallisia ja biologisia muutoksia elävissä kudoksissa. Se on terveydelle haitallista.

Alkuaineilla, joiden järjestysluku on suurempi kuin 92, on vain radioaktiivisia isotooppeja. Myös kevyemmillä alkuaineilla on runsaasti radioaktiivisia isotooppeja. Tyypillisimmät isotoopit, niiden massaluvut ja hajoamistapa on luetteloitu taulukkokirjaan.

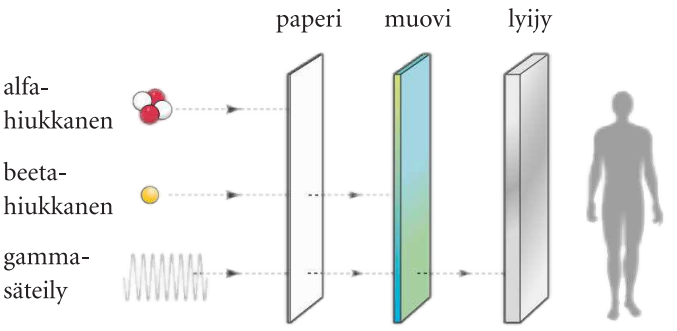
Kun lähtöydin eli **emoydin** hajoaa radioaktiivisessa hajoamisreaktiossa, vapautuu ytimeen sitoutunutta energiaa. **Tytärytimen** ja syntyvän ydinsäteilyhiukkasen yhteenlaskettu massa on pienempi kuin emoytimen massa. Osa emoytimen massasta on muuttunut energiaksi, ja siten tytärytimen sidososuus on suurempi kuin emoytimen. **Hajoamisen reaktioenergia** lasketaan atomimassojen avulla.



▲ **Emoytimen X hajoaminen tytärytimeksi Y ja ydinsäteilyhiukkaseksi Z.**



▶ **Ydinsäteilyn lajit ovat alfa-, beetaplus-, beetamiinus- ja gammasäteily. Hiukkasten ratojen kaartuminen magneettikentässä riippuu hiukkasten sähkövarauksesta ja massasta. Kevyenä hiukkasena beeta kaartuu voimakkaammin kuin alfa. Beetaplus kaartuu vastakkaiseen suuntaan kuin beetamiinus, mutta sen elinikä on hyvin lyhyt.**



▲ **Jokaisella säteilylajilla on sille ominainen kyky läpäistä ainetta.**

Hajoamisenergia

Ytimen X hajoamisessa vapautuva hajoamisen reaktioenergia eli hajoamisenergia on

$$Q = (m_{\text{X-ydin}} - m_{\text{Y-ydin}} - m_{\text{Z}})c^2$$
$$= (m_{\text{X-atomi}} - m_{\text{Y-atomi}} - m_{\text{Z}})c^2,$$

jossa

$m_{\text{X-ydin}}$ on emoytimen massa,

$m_{\text{Y-ydin}}$ on tytärytimen massa ja

m_{Z} on vapautuvan hiukkasen massa.

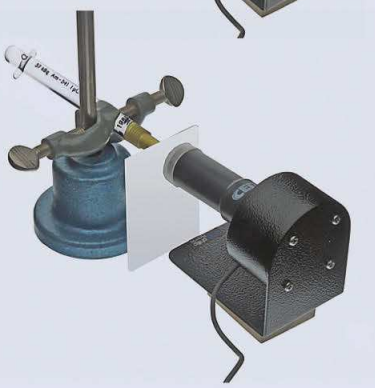
Koska ytimen massoja ei ole lueteltu taulukkokirjassa, niin laskuissa käytetään atomien massoja $m_{\text{X-atomi}}$ ja $m_{\text{Y-atomi}}$.

▲ **Hiiliajoitus perustuu hiilen beeta-aktiiviseen radiohiileen $^{14}_{6}C$, jonka määrä näytteessä pienenee puoleen noin 5 730 vuodessa. Radiohiiltä syntyy jatkuvasti yläilmakehän typestä kosmisen säteilyn aiheuttamana ja sen määrän on arvioitu pysyneen samana ilmakehässä ainakin kymmenien tuhansien vuosien ajan. Kun eliö kuolee, se ei saa enää $^{14}_{6}C$ -ytimiä, joten niiden osuus alkaa vähentyä hajoamisen seurauksena. Eliön ikä voidaan laskea vertaamalla radiohiilen määrää kuolleessa ja elävässä organismissa.**

Tutki & kokeile

Tutki alfa-aktiivista ainetta.

1. Mittaa aineesta lähtevä säteily niin, että geiger-putki on näytteen lähellä.



2. Aseta säteilylähteen eteen ohut paperi, paksu paperi, alumiinifolio, ym. erilaisia ja eripaksuisia materiaaleja. Mittaa, miten säteily vaimenee.

3. Aseta säteilylähteen lähelle voimakas kestomagneetti. Miten magneetti vaikuttaa havaittujen pussien määrään?

Tutki & kokeile

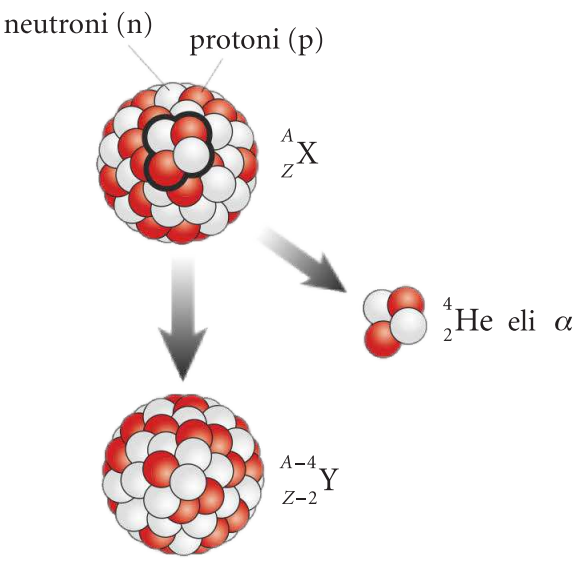
Tutki eri kohteiden lähettämää säteilyä.

1. Tutki geigermittarilla säteilyn määrää rakennuksen sisällä ja ulkona kaukana säteilylähteistä. Mitä havaitset? Selitä havainnot.
2. Tutki geigermittarilla säteilyä palovaroittimen kuoresta. Jos mahdollista, pura palovaroitin ja etsi säteilylähde. Mittaa sen lähettämää säteilyä.

Tutki & kokeile

Tutki beeta-aktiivista ainetta.

1. Aseta säteilylähteen eteen ohut paperi, paksu paperi, alumiinifolio, ym. erilaisia ja eripaksuisia materiaaleja. Miten säteily läpäisee eri materiaalit?
2. Aseta beetalähteen ja geigerputken väliin alumiinifolioita yksitellen. Kuinka monta alumiinifoliota vaimentaa beetasäteilyn taustasäteilyn tasolle?
3. Aseta säteilylähteen lähelle voimakas kestomagneetti. Miten magneetti vaikuttaa havaittujen pulssien määrään?



▲ **Alfahajoamisessa atomiydin lähettää kahden protonin ja kahden neutronin muodostaman α-hiukkasen.**

Alfahajoaminen

Alfahajoamisessa atomiytimestä poistuu α-hiukkanen. Sen rakenne vastaa $^{4}_{2}He$ -atomin ydintä. Niiden alkuaineiden isotoopit, joiden järjestysluku on suurempi kuin lyijyn ($Z = 82$) ovat alfa-aktiivisia.

Syynä siihen, että ydin hajoaa lähettämällä α-hiukkasen eikä yksittäisiä protoneja ja neutroneja, on α-hiukkasen suuri, noin 7,1 MeV:n sidososuus. Yksittäisen nukleonin poistuminen ytimestä vaatii energiaa suurin piirtein sidososuuden verran, eikä se siten voi tapahtua spontaanisti. Kun ytimen neljä nukleonia yhtyy alfahiukkaseksi, vapautuu sidosenergiaa, jolloin alfahiukkasen on mahdollista irrota ytimestä. Hajoamisessa emoytimen massaluku pienenee neljällä ja järjestysluku kahdella.

α-hajoamisen hajoamisyhtälö

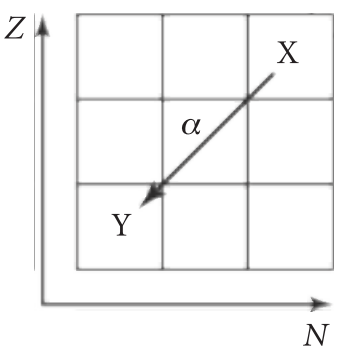
$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2},$$

jossa

$^{A}_{Z}X$ on emoydin,

$^{A-4}_{Z-2}Y$ on tytärydin ja

$^{4}_{2}He$ on heliumydin eli alfahiukkanen.



▲ **α-hajoaminen nuklidikartalla. Hajoamisessa emoytimen järjestysluku ja neutroniluku pienenevät kahdella.**

Alfahiukkasen ja tytärytimen massojen summa on pienempi kuin emoytimen massa, joten reaktiossa vapautuu energiaa.

α-hajoamisen hajoamisenergia

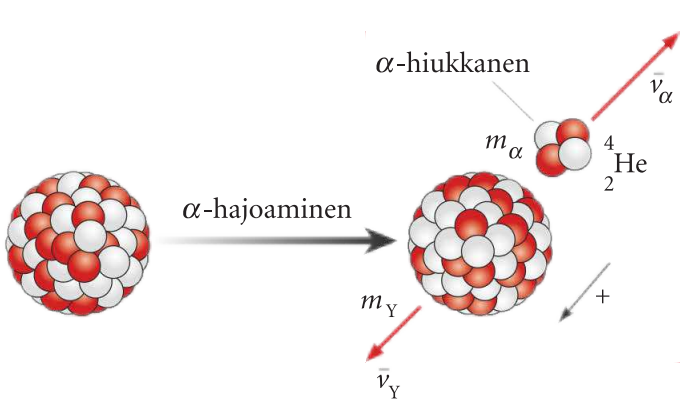
Hajoamisreaktiossa vapautuva energia lasketaan massan muutoksen avulla

$$\begin{aligned} Q &= \Delta mc^2 \\ &= (m_{\text{X-ydin}} - m_{\text{Y-ydin}} - m_\alpha)c^2 \\ &= (m_{\text{X-atomi}} - m_{\text{Y-atomi}} - m_{\text{He-atomi}})c^2. \end{aligned}$$

Laskuissa käytetään alkuaineiden X, Y ja He atomimassoja m_{X}, m_{Y} ja m_{He}.

Energian säilymislain perusteella hajoamisenergia $Q = \Delta mc^2$ siirtyy tytärytimen ja alfahiukkasen liike-energiaksi

$$Q = \frac{1}{2}m_{\text{Y}}v_{\text{Y}}^2 + \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2.$$



Koska myös liikemäärä säilyy, reaktiossa tytärydin ja α-hiukkanen lähtevät hajoamisen jälkeen vastakkaisiin suuntiin. Jos emoydin on levossa ennen hajoamista, niin liikemäärän säilymislain perusteella tytärytimen ja α-hiukkasen liikemäärä on

$$\bar{0} = m_{\text{Y}}\bar{v}_{\text{Y}} + m_\alpha\bar{v}_\alpha,$$

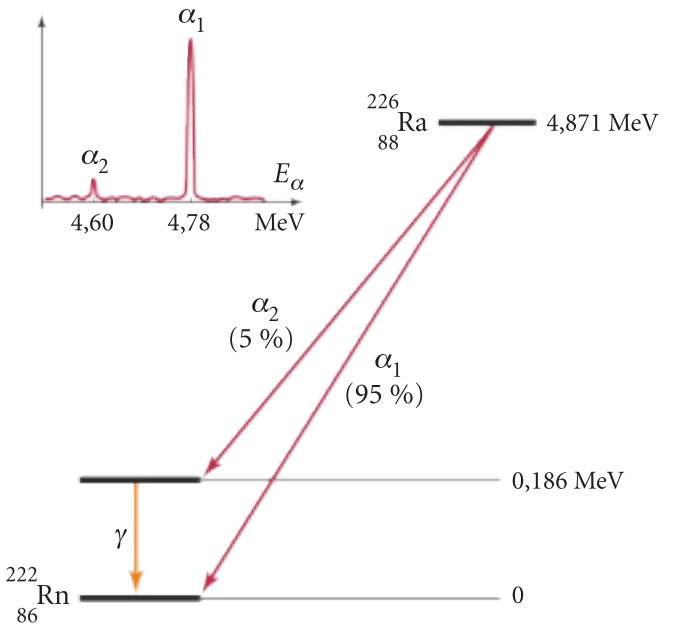
josta suunnat huomioiden

$$0 = m_{\text{Y}}v_{\text{Y}} - m_\alpha v_\alpha.$$

Energian ja liikemäärän yhtälöistä saadaan yhtälöpari, josta ratkaistaan kysytty suure esimerkin 2 mukaisesti.

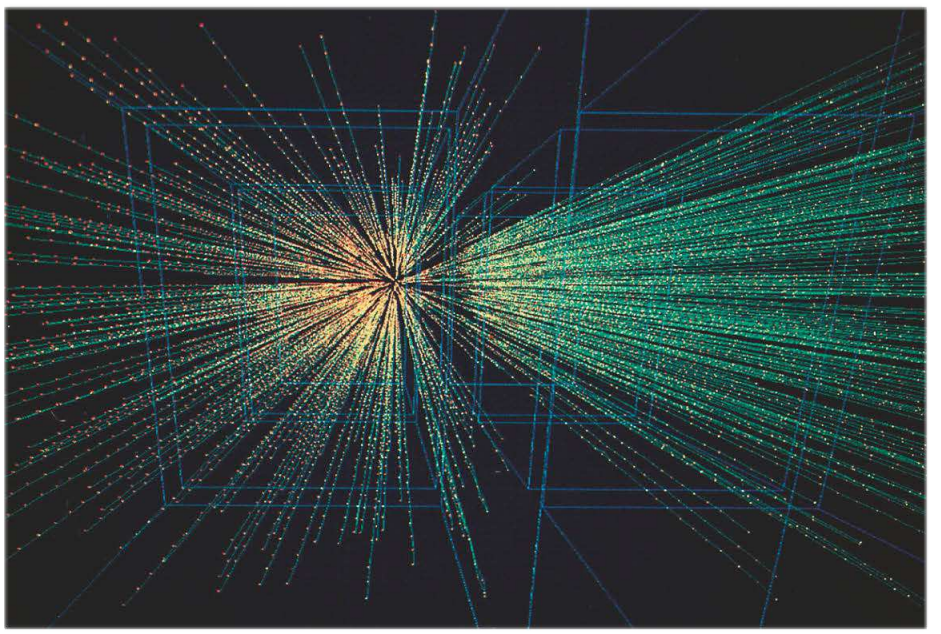
Alfahajoamisessa α-hiukkaset saavat energian, joka on tyypillisesti alle 8 MeV. Hajoamisen seurauksena syntynyt tytärydin voi jäädä virittyneeseen tilaan. Ytimen energiatilat ovat kvantittuneet vastaavalla tavalla kuin atomin elektroniverhon energia. **Kun viritystila purkautuu, ydin lähettää gammakvantin.** Ytimen viritystilojen purkautumisessa syntyvien gammakvanttien energiat ovat paljon suurempia (suuruusluokkaa MeV) kuin atomien emittoimien kvanttien energiat (suuruusluokkaa eV).

Seuraavassa kuvassa on esitetty radiumin **hajoamiskaavio**.



▲ **Kuvassa on esitetty radium-isotoopin $^{226}_{88}$Ra hajoamiskaavio ja alfahiukkasen energiaspektri. Radiumin alfahajoaminen $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$ voi tapahtua kahdella tavalla. ^{226}Ra:n hajoamisista 95 % tapahtuu niin, että tytärydin on perustilassa. 5 % hajoamisista taas tapahtuu niin, että radonytimet jäävät virittyneeseen tilaan, ja kun se purkautuu, vapautuu gammakvantti. Koska osa hajoamisenergiasta jää tytärytimelle, niin alfahiukkasen saama liike-energia on pienempi kuin hajoamisessa vapautuva energia.**

Alfahiukkasen kantama ilmassa on vain muutamia senttimetrejä, koska se ionisoi runsaasti ilman molekyylejä. **Törmäyksissä alfahiukkanen vuorovaikuttaa näiden molekyylien elektroniverhojen kanssa** ja menettää nopeasti liike-energiansa. Esimerkiksi alfahiukkanen, jonka energia on 5,0 MeV, kulkee ilmassa 3,6 cm. Koska alfahiukkasen massa on yli 7 000 elektronin massaa, se etenee suoraviivaisesti muuttamatta suuntaansa. Todennäköisyys, että α-hiukkanen osuu ilmassa ytimeen, on hyvin pieni.



▲ **Alfahiukkaset etenevät suoraviivaisesti. Alfahiukkasten kulkutielle muodostuu ionien vana.**

Alfahiukkanen pysähtyy muun muassa muoviin ja paperiin eikä läpäise myöskään ihon pintakerrosta. Jos alfa-aktiivista ainetta joutuu elimistöön hengitetyn ilman, ravinnon tai avohaavojen kautta, se on erityisen vaarallista. Alfahiukkasten kulkutielle muodostuu ionien vana: esimerkiksi vedessä voi muodostua tuhansia ionipareja mikrometrin matkalle.

Huom.

Kaikissa ytimiin liittyvissä muutoksissa pätee

- varauksen säilymisen periaate
- kokonaisenergian säilymisen periaate
- liikemäärän säilymisen periaate.

▶ **Kiihdytintunnelissa on huolehdittava säteilyturvallisuudesta.**

Esimerkki 1

Mikä ydin syntyy, kun alfa-aktiivinen radon-222-isotooppi hajoaa? Kirjoita hajoamisyhtälö.

Ratkaisu

Taulukkokirjan isotooppitaulukosta löydetään radonin järjestysluku, $Z = 86$.

Järjestysluku pienenee kahdella

$$Z = 86 - 2 = 84,$$

joten taulukkokirjan mukaan tytärydin on polonium.

Massaluku pienenee neljällä

$$A = 222 - 4 = 218.$$

Kirjoitetaan hajoamisyhtälö

$$^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Vastaus

Radonin hajotessa syntyy polonium-isotooppi $^{218}_{84}\mathrm{Po}$.

Esimerkki 2

a) Kirjoita alfa-aktiivisen isotoopin $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ hajoamisyhtälö.
b) Laske hajoamisreaktiossa tapahtuva massan muutos.
c) Laske hajoamisen reaktioenergia eli hajoamisenergia.
d) Mikä on alfahiukkasen liike-energia, jos reaktiossa ei synny gammasäteilyä?
e) Kuinka suuri alfahiukkasen lähtönopeus on hajoamisen jälkeen?

Ratkaisu

a) Radium hajoaa radoniksi seuraavan yhtälön mukaisesti $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

b) Massan muutos on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Ra-ydin}} - m_{\text{Rn-ydin}} - m_{\alpha} \\ &= m_{\text{Ra-atomi}} - 88m_{\text{e}} - \\ &\quad \left[m_{\text{Rn-atomi}} - 86m_{\text{e}} + m_{\text{He-atomi}} - 2m_{\text{e}}\right] \\ &= m_{\text{Ra-atomi}} - m_{\text{Rn-atomi}} - m_{\text{He-atomi}} \\ &= 226{,}025402\,\text{u} - 222{,}017570\,\text{u} - \\ &\quad 4{,}002603\,\text{u} = 0{,}005229\,\text{u}.\end{aligned}$$

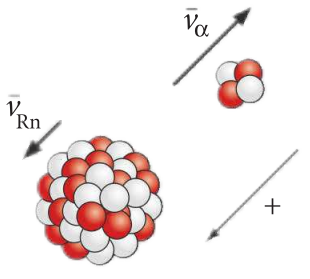
c) Hajoamisenergia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta mc^2 = 0{,}005229\,\text{u} \cdot 931{,}5\,\frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\ &= 4{,}870814\,\text{MeV} \approx 4{,}871\,\text{MeV}.\end{aligned}$$

d) Hajoamisreaktiossa vapautuva energia

$$Q = 4{,}870814\ \text{MeV}$$

jakaantuu radonytimen ja α-hiukkasen liike-energiaksi $Q = \frac{1}{2}m_{\text{Rn}}v_{\text{Rn}}^2 + \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2$ niin, että liikemäärä säilyy. Kun radonytimen nopeuden suunta valitaan positiiviseksi, liikemäärän säilymislaista saadaan



$$\bar{0} = m_{\text{Rn}}\bar{v}_{\text{Rn}} + m_{\alpha}\bar{v}_{\alpha}$$

$$0 = m_{\text{Rn}}v_{\text{Rn}} - m_{\alpha}v_{\alpha},$$

josta voidaan ratkaista radonytimen nopeus

$$v_{\text{Rn}} = \frac{m_{\alpha}v_{\alpha}}{m_{\text{Rn}}}.$$

Sijoitetaan tämä energiayhtälöön

$$Q = \frac{1}{2}m_{\text{Rn}}\left(\frac{m_{\alpha}v_{\alpha}}{m_{\text{Rn}}}\right)^2 + \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2$$

$$\begin{aligned}Q &= \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2\left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Rn}}} + 1\right) \\ &= E_{\text{k}\alpha}\left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Rn}}} + 1\right) = E_{\text{k}\alpha}\left(\frac{m_{\text{Rn}} + m_{\alpha}}{m_{\text{Rn}}}\right).\end{aligned}$$

Ratkaistaan α-hiukkasen liike-energia

$$E_{\text{k}\alpha} = \left(\frac{m_{\text{Rn}}}{m_{\text{Rn}} + m_{\alpha}}\right)Q.$$

Laskussa käytetään alfahiukkasen massaa. Tytärydintä vastaava massan arvo sisältää kahden ylimääräisen elektronin massan, mutta niiden merkitys liikemäärän laskemisessa on mitätön, koska elektronien massa on pieni verrattuna ytimen massoihin.

$$\begin{aligned}E_{\text{k}\alpha} &= \left(\frac{222{,}017570\,\text{u}}{222{,}017570\,\text{u} + 4{,}001507\,\text{u})}\right) \cdot 4{,}870814\,\text{MeV} \\ &= 4{,}784579\,\text{MeV} \approx 4{,}785\,\text{MeV}.\end{aligned}$$

e) Lasketaan vielä alfahiukkasen liike-energian $E_{\text{k}\alpha} = 4{,}784579\,\text{MeV}$ perusteella sen lähtönopeus eli

$$E_{\text{k}\alpha} = \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2,$$

josta

$$\begin{aligned}v_{\alpha} &= \sqrt{\frac{2E_{\text{k}\alpha}}{m_{\alpha}}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}784579 \cdot 10^6 \cdot 1{,}602177 \cdot 10^{-19}\,\text{J}}{4{,}001507\,\text{u} \cdot 1{,}660566 \cdot 10^{-27}\,\frac{\text{kg}}{\text{u}}}} \\ &= 1{,}5189806 \cdot 10^7\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1{,}519 \cdot 10^7\,\frac{\text{m}}{\text{s}}.\end{aligned}$$

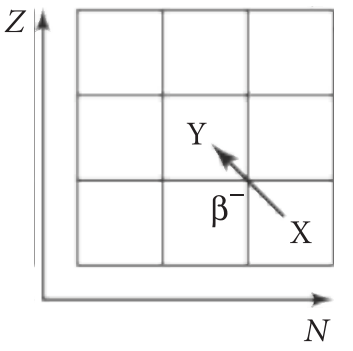
Vastaus

b) Massan muutos on 0,005229 u.
c) Hajoamisenergia on 4,871 MeV.
d) α-hiukkasen energia on 4,785 MeV.
e) α-hiukkasen lähtönopeus on $1{,}519 \cdot 10^7$ m/s.

Beetahajoaminen

Beetahajoaminen voi tapahtua kahdella tavalla: **β^--hajoaminen** tapahtuu, kun heikko vuorovaikutus saa ytimen neutronin muuttumaan protoniksi, ja **β^+-hajoaminen** tapahtuu, kun ytimen protoni muuttuu neutroniksi. Tällöin ytimen massaluku (A) ei muutu, mutta järjestysluku (Z) kasvaa tai vähenee yhden yksikön verran.

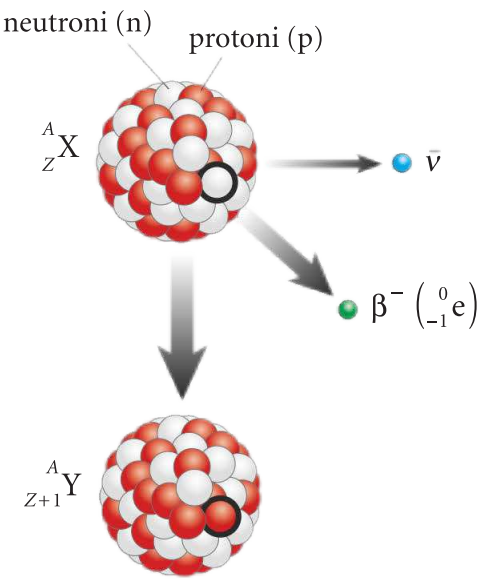
β^--hajoamisessa atomiytimestä poistuu **elektroni** (${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ eli β^-) ja **antineutriino** ($\bar{\nu}$) ja vapautuu energiaa. Antineutriino on neutraali hiukkanen, jonka vuorovaikutus aineen kanssa on hyvin heikko. Sen massa on hyvin pieni ja nopeus lähes valonnopeus. Antineutriino on neutriinon antihiukkanen, joista kerrotaan enemmän luvussa 8.

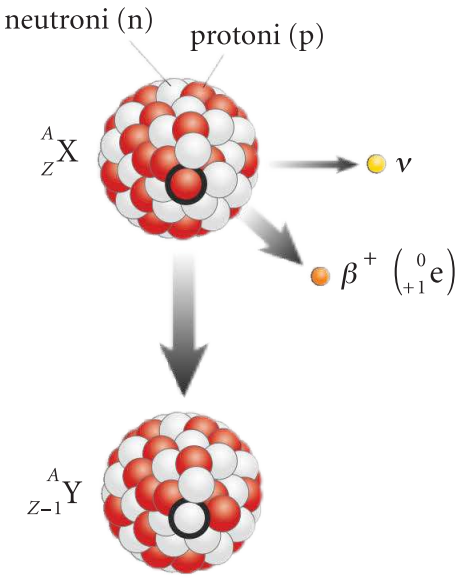


▲ **β^--hajoaminen nuklidikartalla. Neutroniluku pienenee yhdellä ja protoniluku kasvaa yhdellä.**

β^+-hajoamisessa atomiytimestä poistuu elektronin antihiukkanen **positroni** (${}^{0}_{+1}\mathrm{e}$ eli β^+) ja **neutriino** (ν), ja samalla atomiydin siirtyy alempaan energiatilaan. Kuten antineutriino myös neutriino on neutraali hiukkanen, jonka vuorovaikutus aineen kanssa on hyvin heikko.

▶ **β^--hajoamisessa neutroni muuttuu protoniksi. On huomattava, että ytimessä ei ole elektroneja, vaikka sieltä sellainen ulos tuleekin.**





▲ **β^+-hajoaminen, jossa ytimen protoni muuttuu neutroniksi ja ytimestä lähtee positroni ja neutriino. β^--hiukkanen (elektroni) on helppo havaita, joten β^--säteily löydettiin paljon aikaisemmin kuin β^+-säteily, sillä positroni häviää kohdatessaan elektroniin.**

β^-- hajoamisen hajoamisyhtälö

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y}_{N-1} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}, $$

jossa

- ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ on emoydin,
- ${}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y}$ on tytärydin,
- ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ on elektroni eli β^--hiukkanen ja
- $\bar{\nu}$ on antineutriino.

Kun neutroni hajoaa, syntyy protoni, elektroni ja antineutriino

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}. $$

β⁺-hajoamisen hajoamisyhtälö

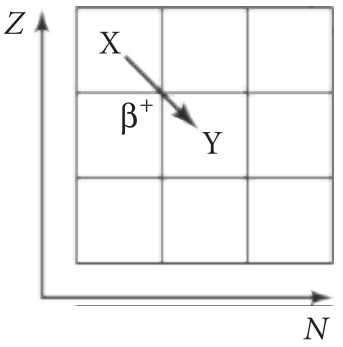
$${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}_{N+1} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu\,,$$

jossa

- ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ on emoydin,
- ${}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}$ on tytärydin,
- ${}^{0}_{+1}\mathrm{e}$ on positroni eli β⁺-hiukkanen ja ν on neutriino.

Kun protoni hajoaa, syntyy neutroni, positroni ja neutriino

$${}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu.$$



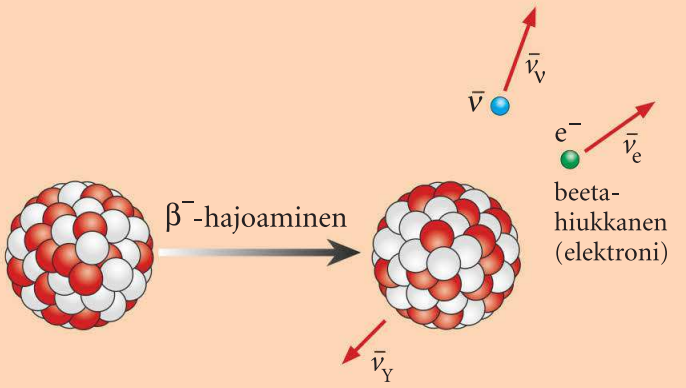
▲ **β⁺-hajoaminen nuklidikartalla. Protoniluku pienenee yhdellä ja neutroniluku kasvaa yhdellä.**

Beetahajoamisessa vapautuva hajoamisenergia lasketaan reaktiossa tapahtuvan massan muutoksen Δm avulla vastaavalla tavalla kuin alfahajoamisen yhteydessä. Hajoamisenergia havaitaan hajoamistuotteiden liike-energiana. Koska neutriinon ja antineutriinon massat ovat hyvin pieniä, ne jätetään laskussa pois.

Ydin voi jäädä myös beetahajoamisen jälkeen virittyneeseen tilaan samalla tavalla kuin alfahajoamisen yhteydessä. Beeta-aktiiviset aineet voivat lähettää siis myös gammasäteilyä.

Beetasäteily on nopeista elektroneista tai positroneista koostuvaa ionisoivaa säteilyä, joka ionisoi selvästi heikommin kuin alfasäteily. Koska beetahiukkanen on paljon kevyempi kuin ilman molekyylit, joiden elektronien kanssa se vuorovaikuttaa, beetahiukkasen rata ilmassa on mutkitteleva siksak-rata. Beetahiukkaset menettävät liike-energiaansa pääasiassa kimmotessaan aineen elektroneista ja ytimistä. Yksittäiset beetahiukkaset etenevät hyvin eri etäisyyksille, ja ne voivat menettää jopa koko energiansa yhdessä törmäyksessä.

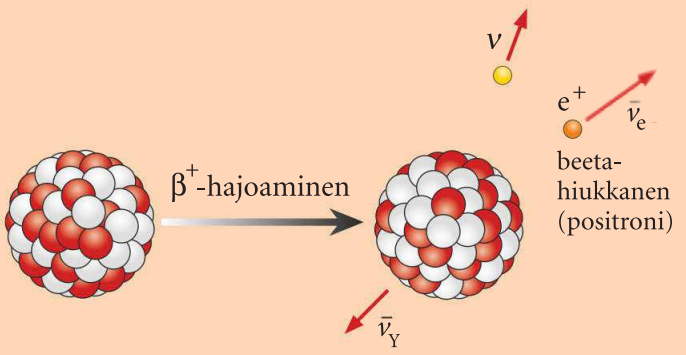
β⁻-hajoamisen hajoamisenergia



$$Q = (m_{\text{X-ydin}} - m_{\text{Y-ydin}} - m_{\text{e}})c^2$$
$$= (m_{\text{X-atomi}} - Zm_{\text{e}} - \left[m_{\text{Y-atomi}} - (Z+1)m_{\text{e}}\right] - m_{\text{e}})\,c^2$$
$$= (m_{\text{X-atomi}} - m_{\text{Y-atomi}})c^2.$$

Laskuissa käytetään alkuaineiden X ja Y atomimassoja m_{X} ja m_{Y}.

β⁺-hajoamisen hajoamisenergia



$$Q = (m_{\text{X-ydin}} - m_{\text{Y-ydin}} - m_{\text{e}})c^2$$
$$= (m_{\text{X-atomi}} - Zm_{\text{e}} - \left[m_{\text{Y-atomi}} - (Z-1)m_{\text{e}}\right] - m_{\text{e}})\,c^2$$
$$= (m_{\text{X-atomi}} - m_{\text{Y-atomi}} - 2m_{\text{e}})c^2.$$

Laskuissa käytetään alkuaineiden X ja Y atomimassoja m_{X} ja m_{Y}.

Huom.
β⁺-hajoamisen hajoamisenergian lausekkeeseen jää kahden elektronin massa.

Esimerkki 3

Kuparin ^{64}Cu-isotooppi voi hajota sekä β^-- että β^+-hajoamisprosessin kautta.

a) Kirjoita hajoamisen reaktioyhtälöt.
b) Laske hajoamisissa vapautuvat energiat.

Ratkaisu:

a) Kuparin β-hajoamisen hajoamisyhtälöt ovat

$$\beta^-: \ {}^{64}_{29}\mathrm{Cu}_{35} \rightarrow {}^{64}_{30}\mathrm{Zn}_{34} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}$$

$$\beta^+: \ {}^{64}_{29}\mathrm{Cu} \rightarrow {}^{64}_{28}\mathrm{Ni} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu.$$

b) Kuparin β^--hajoamisessa tapahtuva massan muutos on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Cu-ydin}} - m_{\text{Zn-ydin}} - m_\mathrm{e} \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - 29m_\mathrm{e} - \left[m_{\text{Zn-atomi}} - 30m_\mathrm{e}\right] - m_\mathrm{e} \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - m_{\text{Zn-atomi}} \\ &= 63{,}929765\,\mathrm{u} - 63{,}929145\,\mathrm{u} \\ &= 6{,}20 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{u}.\end{aligned}$$

Reaktioenergia on

$$\begin{aligned}Q &= 6{,}2 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{u} \cdot 931{,}5\,\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}} \\ &= 0{,}57753\,\mathrm{MeV} \approx 0{,}578\,\mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Kuparin β^+-hajoamisen massan muutos on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Cu-ydin}} - m_{\text{Ni-ydin}} - m_\mathrm{e} \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - 29m_\mathrm{e} - \left[m_{\text{Ni-atomi}} - 28m_\mathrm{e}\right] - m_\mathrm{e} \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - m_{\text{Zn-atomi}} - 2m_\mathrm{e} \\ &= 63{,}929765\,\mathrm{u} - 63{,}927968\,\mathrm{u} - 2 \cdot 0{,}000549\,\mathrm{u} \\ &= 6{,}99 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{u}.\end{aligned}$$

Reaktioenergia on

$$\begin{aligned}Q &= 6{,}99 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{u} \cdot 931{,}5\,\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}} \\ &= 0{,}6511185\,\mathrm{MeV} \approx 0{,}651\,\mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Vastaus

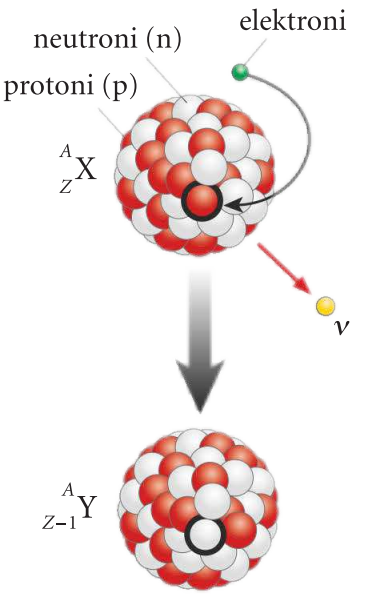
b) Kuparin β^--hajoamisessa vapautuva energia on 0,578 MeV, ja kuparin β^+-hajoamisessa vapautuva energia on 0,651 MeV.

Elektronisieppaus (EC) ja spontaani fissio

Ydin voi myös siepata elektronin elektroniverhon sisimmiltä kuorilta. Ytimessä elektroni reagoi protonin kanssa, jolloin muodostuu neutroni, joka jää ytimeen. Samalla ytimestä lähtee neutriino ja vapautuu energiaa γ-säteilynä.

Elektronisieppauksen reaktioyhtälö on

$${}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \nu.$$

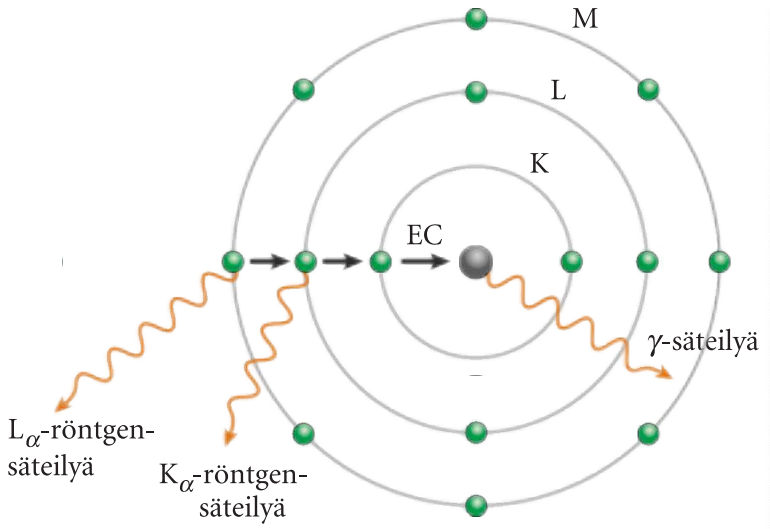


▲ **Elektronisieppaus tapahtuu sitä helpommin, mitä suurempi ytimen järjestysluku on, koska silloin ytimen sähkökenttä on voimakkaampi ja elektronit ovat lähellä ydintä. Ytimessä elektroni reagoi protonin kanssa, jolloin muodostuu neutroni ja neutriino.**

Elektronisieppauksessa ytimen järjestysluku pienenee ja neutroniluku suurenee hajoamisyhtälön mukaisesti

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}_{\mathrm{N}+1} + \nu.$$

Elektronisieppauksen jälkeen elektroniverho jää viritystilaan, jonka purkautuessa atomista vapautuu yksi tai useampi röntgenkvantti. Elektronisieppaus tunnistetaankin tytäratomin karakteristisesta röntgensäteilystä (ominaissäteilystä).



▲ **Kuvassa ydin sieppaa elektronin elektroniverhon alimmalta kuorelta ja ytimestä vapautuu energiaa γ-säteilynä. Kun ylemmiltä kuorilta elektroni siirtyy täyttämään alimmalle kuorelle syntyneen aukon, atomista vapautuu röntgensäteilyä.**

Spontaanissa fissiossa raskas ydin hajoaa itsestään ilman ulkoista syytä kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi. Luonnossa vain uraani-235 hajoaa spontaanisti, mutta tämänkin hajoamisen todennäköisyys on erittäin pieni. Keinotekoisesti valmistetuilla raskailla nuklideilla spontaani fissio on yleisempää kuin uraani-235:llä. Spontaanissa fissiossa vapautuu yleensä kaksi tai kolme neutronia.

Esimerkki 4

Esimerkin 3 kupariydin voi myös siepata elektronin alimmilta elektronikuorilta. Kirjoita hajoamisen reaktioyhtälö ja laske vapautuva energia.

Ratkaisu

Elektronisieppauksen hajoamisyhtälö on

$$^{64}_{29}\mathrm{Cu} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{64}_{28}\mathrm{Ni} + \nu.$$

Massan muutos kuparin elektronisieppauksessa on

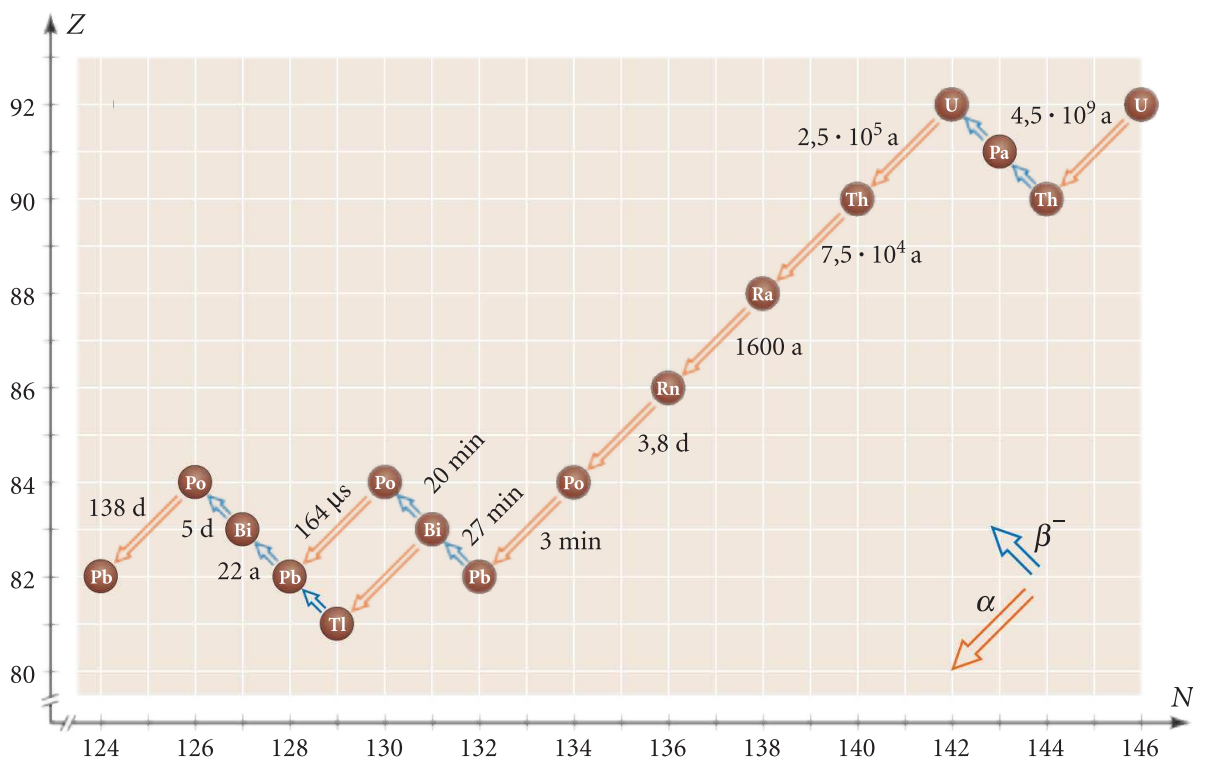
$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Cu-ydin}} + m_\mathrm{e} - m_{\text{Ni-ydin}} \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - 29m_\mathrm{e} + m_\mathrm{e} - \left[m_{\text{Ni-atomi}} - 28m_\mathrm{e}\right] \\ &= m_{\text{Cu-atomi}} - m_{\text{Ni-atomi}} \\ &= 63{,}929765\,\mathrm{u} - 63{,}927968\,\mathrm{u} \\ &= 0{,}001797\,\mathrm{u}.\end{aligned}$$

Hajoamisen reaktioenergia on

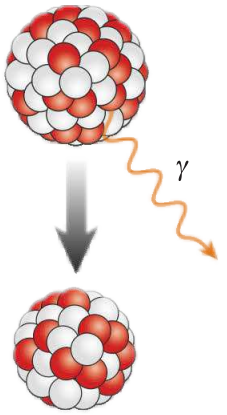
$$\begin{aligned}Q &= 0{,}001797\,\mathrm{u} \cdot 931{,}5\,\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}} \\ &= 1{,}6739055\,\mathrm{MeV} \approx 1{,}674\,\mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Vastaus

Elektronisieppauksessa vapautuva energia on 1,674 MeV.



◀ **Pitkäikäiset radioaktiiviset aineet ovat syntyneet supernovavaiheessa olevien tähtien sisuksissa. Pääosa luonnon radioaktiivisista aineista kuuluu jonkin pitkäikäisen radioaktiivisen aineen hajoamissarjaan, joita on kolme: uraani-, torium- ja aktiniumsarja. Neljäs neptuniumsarja on jo ehtinyt hävitä. Jokainen sarja alkaa pitkäikäisestä nuklidista. Peräkkäisten alfa- ja beetahajoamisten jälkeen sarja päättyy pysyvään nuklidiin. Sarjassa esiintyvien nuklidien massaluvut muuttuvat neljän välein, koska massaluku muuttuu α-hajoamisessa.**



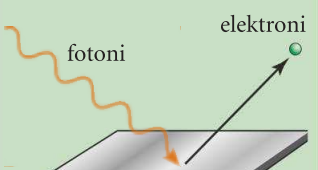
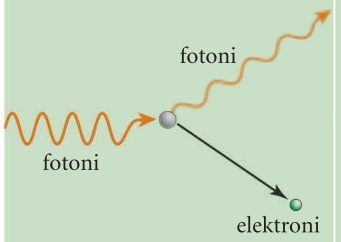
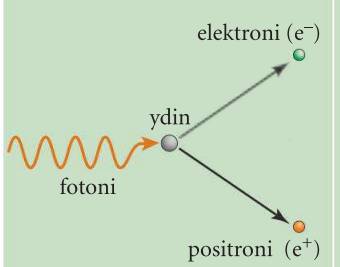
▲ **Alfa- tai beetahajoamisen jälkeen ydin voi jäädä virittyneeseen tilaan. Kun ytimen viritystila purkautuu, energia vapautuu gammakvanttina.**

Gammasäteily

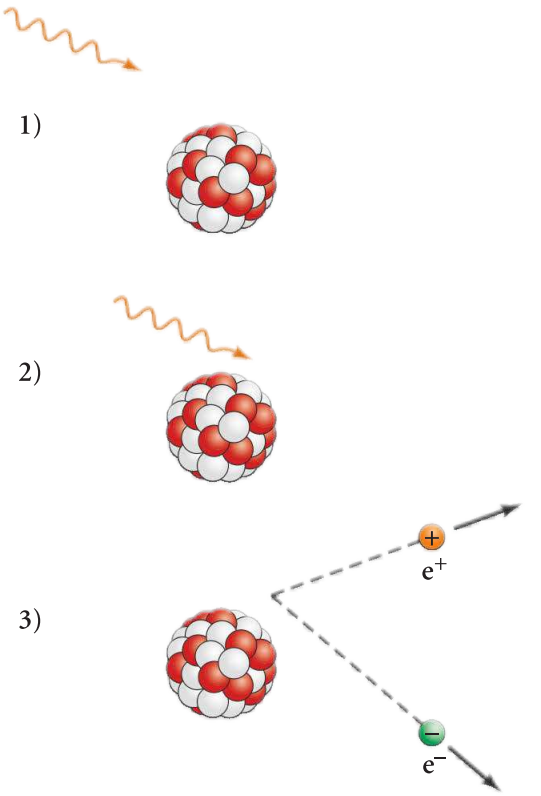
Kun ydin siirtyy virittyneestä tilasta alempaan viritystilaan tai perustilaan, vapautuu gammakvantti.

Gammasäteilyn perusteella voidaan tunnistaa radioaktiivisia aineita, koska gammasäteilyn energia ja siten säteilyn aallonpituus riippuvat ytimestä, josta säteily on peräisin.

Gammasäteily vuorovaikuttaa aineen kanssa kolmella tavalla. Aikaisemmin on opiskeltu valosähköilmiö ja Comptonin ilmiö. Kolmas vuorovaikutustapa on **parinmuodostus**. Siinä fotoni muuttuu hiukkas-antihiukkas-pariksi raskaan atomiytimen sähkökentässä. Reaktio voi tapahtua, jos fotonin energia on suurempi kuin hiukkasten lepoenergioiden summa.

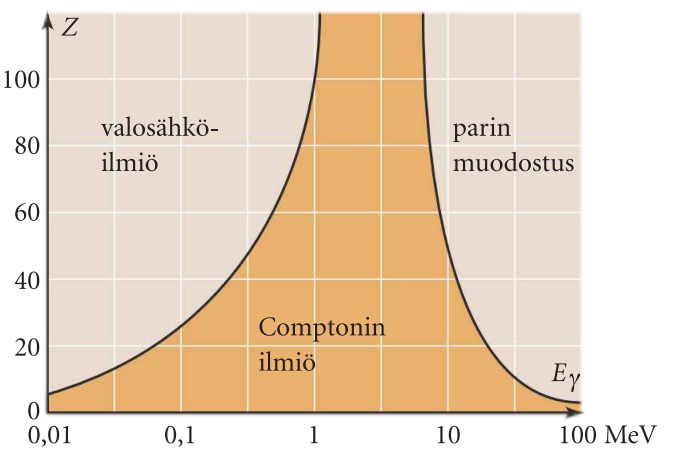
Valosähköinen ilmiö 	Sähkömagneettisen säteilyn fotoni irrottaa metallin pinnasta elektronin.	Fotonin energia menee irrotustyöhön ja irronneen elektronin liike-energiaksi. $hf = W_0 + E_{\mathrm{kmax}}$
Comptonin ilmiö 	Aineeseen tuleva fotoni luovuttaa osan energiastaan aineeseen heikosti sitoutuneelle elektronille liike-energiaksi.	Kun fotoni vuorovaikuttaa elektronin kanssa, osa sen energiasta siirtyy elektronille. $hf_1 = hf_2 + \Delta E_{\mathrm{k}}$, $f_1 > f_2$
Parinmuodostus 	Kun fotoni on vuorovaikutuksessa raskaan atomiytimen sähkökentän kanssa, se muuttuu hiukkas-antihiukkas-pariksi. $\gamma \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e}$	Fotonin energian on oltava yhtä suuri kuin syntyvien hiukkasten yhteenlasketun energian $hf = E_{\mathrm{k,\,e^-}} + E_{\mathrm{k,\,e^+}} + 2m_0c^2$

▶ **Gammakvantin vuorovaikutus aineen kanssa riippuu gammakvantin energiasta (vaaka-akselilla) ja ytimen järjestysluvusta (pystyakselilla). Valosähköilmiö on tyypillinen, kun kvantin energia on pieni. Parinmuodostus tapahtuu, kun kvantin energia on suuri.**



▲ **Kuvassa gammakvantista syntyy elektroni-positronipari $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$. Fotonin energiasta osa muuttuu hiukkasparin lepoenergiaksi ja loppu jää parin liike-energiaksi. Kvantin energian on oltava yhtä suuri kuin syntyvien hiukkasten yhteenlasketun energian.**

Gammasäteily vaimenee parhaiten raskaissa alkuaineissa, koska säteilyn vuorovaikutus tapahtuu pääasiassa elektronien kanssa. Raskailla alkuaineilla elektroneja on paljon. Viereisen taulukkoon on koottu erilaiset vuorovaikutustapahtumat. Kaaviokuvassa on esitetty, miten vuorovaikutustapahtuma on riippuvainen gammasäteilyn energiasta ja vuorovaikuttavan ytimen järjestysluvusta.



Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

5.2 Hajoamislaki

Radioaktiivisen ytimen hajoaminen tapahtuu satunnaisesti. Yksittäisen ytimen hajoamisen ajankohtaa ei voi tietää ennakolta eikä hajoamista voida nopeuttaa eikä hidastaa. Radioaktiivisen aineen hajoamiseen eivät vaikuta ulkoiset olosuhteet, kuten lämpötila ja paine. Jos ytimiä on runsaasti, niiden käyttäytyminen voidaan kuitenkin hallita tilastollisesti.

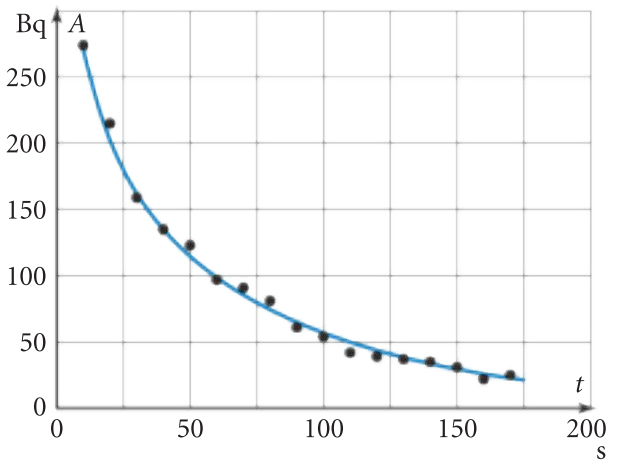
Aktiivisuus

Radioaktiivisuuden voimakkuutta kuvataan suureella aktiivisuus. Aktiivisuus ilmaisee, kuinka monta hajoamista radioaktiivisessa näytteessä tapahtuu sekunnissa.

Aktiivisuuden yksikkö on **becquerel** (äännetään bekrél), 1 Bq, joka vastaa yhtä hajoamista sekunnissa

$$[A] = 1\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 1\,\mathrm{Bq}\ \text{(becquerel)}.$$

Erään radioaktiivista isotooppia sisältävän näytteen aktiivisuus mitattiin 10 sekunnin välein. Mittaustulokset on merkitty aika–aktiivisuuskoordinaatistoon, ja tuloksiin on sovitettu käyrä.



Kuvaajan mukaan näytteen aktiivisuus vähenee ajan funktiona eksponentiaalisesti. Kun radioaktiivinen näyte sisältää yhtä radioaktiivista ydinlajia, jonka tytärytimet ovat pysyviä, näytteen aktiivisuuden muutosta kuvaa **hajoamislaki**. Hajoamislaki aktiivisuudelle johdetaan ekstrassa.

Hajoamislaki aktiivisuuden avulla

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

jossa

- λ on hajoamisvakio,
- A_0 on näytteen aktiivisuus alussa ja
- A on näytteen aktiivisuus ajan t kuluttua.

Hajoamislaissa oleva **hajoamisvakio** λ on jokaiselle ydinlajille ominainen ja sen yksikkö on $[\lambda] = \frac{1}{\mathrm{s}}$.

Jos aikavälillä Δt tapahtuu ΔN hajoamista, aktiivisuus määritelmän mukaan on

$$A = \left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right|.$$

Yhtälössä on itseisarvomerkit, koska ydinten lukumäärän muutos ΔN on negatiivinen.

Kun tarkastellaan yhtä ydinlajia, on ilmeistä, että hetkellinen aktiivisuus on verrannollinen näytteessä olevien radioaktiivisten ydinten lukumäärään N

$$A = \lambda N,$$

jossa verrannollisuuskerroin λ on hajoamisvakio. Siten

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N.$$

Miinusmerkki ilmaisee sen, että aktiivisten ydinten määrä vähenee ajan kuluessa, siis ydinten lukumäärän muutos on negatiivinen.

Koska $A = \lambda N$, voidaan hajoamislaki $A = A_0 e^{-\lambda t}$ lausua ydinten lukumäärän avulla $\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$, josta λ supistuu pois.

Hajoamislaki ydinten lukumäärän avulla

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

jossa

- λ on hajoamisvakio,
- N_0 on hajoavien ydinten lukumäärä alkutilanteessa ja
- N on ajan t kuluttua jäljellä olevien hajoavien ydinten lukumäärä.

Määritelmän mukaan hajonneiden ydinten lukumäärä $\Delta N = N_0 - N$.

Näytteen radioaktiivisista ytimistä hajoaa tietyssä ajassa aina yhtä suuri osa. Tästä syystä radioaktiivisen aineen hajoamisnopeutta voidaan kuvata puoliintumisajalla.

Puoliintumisaika

Puoliintumisaika on aika, jonka kuluessa puolet radioaktiivisen isotoopin ytimistä on hajonnut toisiksi ytimiksi.

Puoliintumisajan kuluessa näytteen aktiivisuus pienenee puoleen.

Johdetaan puoliintumisajan ja hajoamisvakion yhteys.

Kun $t = T_{1/2}$, jäljellä olevien aktiivisten ydinten lukumäärä on $N = \frac{N_0}{2}$, jossa N_0 on aktiivisten ydinten lukumäärä alussa. Hajoamislain mukaan

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}.$$

Otetaan puolittain logaritmi

$$\ln\frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$-\ln 2 = -\lambda T_{1/2} \cdot \ln e.$$

Koska $\ln e = 1$, saadaan

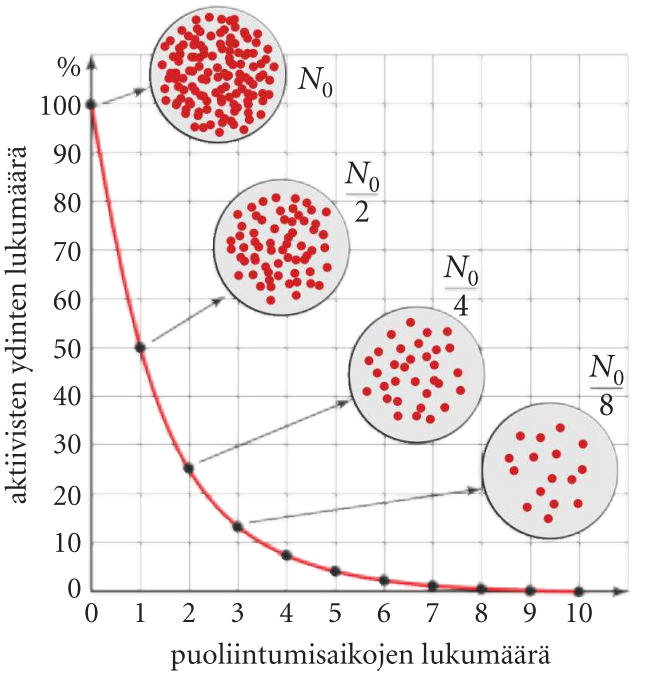
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Puoliintumisajan ja hajoamisvakion yhteys

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Puoliintumisajat vaihtelevat millisekunneista miljardeihin vuosiin. Esimerkiksi krypton-94-kaasun puoliintumisaika on 1,4 sekuntia, vedyn tritium-isotoopin ^{3}H 12,3 vuotta ja uraani-235-isotoopin 700 miljoonaa vuotta. Palovaroittimissa käytettävän amerikium-241:n puoliintumisaika on 432 vuotta.

Puoliintumisaika kuvaa havainnollisesti, miten pysymätön ydin on. Radioaktiivinen näyte on lyhyen aikaa voimakkaasti aktiivinen, kun sen puoliintumisaika on lyhyt. Jos puoliintumisaika on pitkä, näyte on heikosti aktiivinen pitkän aikaa. Puoliintumisajan pituudesta ei voida vielä suoraan päätellä, kuinka vaarallista radioaktiivinen aine on, koska aktiivisuus riippuu myös aineen määrästä.



▲ **Radioaktiivisten emoydinten lukumäärä puoliintuu puoliintumisajan kuluessa. Näytteen aktiivisuus vähenee ajan funktiona eksponentiaalisesti.**

Hajoamislaki EXTRA

Koska aikavälillä Δt hajonneiden ydinten lukumäärä ΔN on suoraan verrannollinen näytteen aktiivisten ydinten lukumäärään N, näytteessä olevien radioaktiivisten ydinten lukumäärä lausuttuna ajan funktiona noudattaa eksponenttifunktiota. Johdetaan seuraavassa tämä riippuvuus.

Aikayksikössä hajoavien ydinten lukumäärä $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$ on suoraan verrannollinen näytteessä olevien aktiivisten ydinten lukumäärään, eli

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = -\lambda N.$$

Ratkaistaan tämä muotoon

$$\frac{\mathrm{d}N}{N} = -\lambda \mathrm{d}t$$

ja integroidaan puolittain aktiivisten ydinten lukumäärän ja ajan suhteen

$$\int_{N_0}^{N} \frac{\mathrm{d}N}{N} = -\int_{0}^{t} \lambda \mathrm{d}t.$$

Ratkaistaan tästä ajan t kuluttua olevien aktiivisten ydinten lukumäärä

$$\int_{N_0}^{N} \ln N = -\int_{0}^{t} \lambda \, \mathrm{t}$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - 0)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

▲ **Palovaroittimen säteilylähteenä käytettävän alfa-aktiivisen amerikium-241-palan aktiivisuus on 40 kBq, eli alfahajoamisia tapahtuu 40 000 kertaa sekunnissa. Suomessa tavallisen pintamaan aktiivisuus on 1–10 Bq grammaa kohden. Sen aktiivisuus aiheutuu kalium-40:n, uraanin ja toriumin hajoamisesta. Ihmisen luustossa oleva radium aiheuttaa noin 4 Bq:n aktiivisuuden.**

Aktiivisuus EXTRA

Määritelmän mukaan aktiivisuus on

$$\begin{aligned} A &= -\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} \\ &= -\frac{\mathrm{d}(N_0 e^{-\lambda t})}{\mathrm{d}t} = -(N_0 e^{-\lambda t} \cdot (-\lambda)) \\ &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ &= \lambda N, \end{aligned}$$

josta aktiivisuus ajan funktiona

$$\begin{aligned} A &= \lambda N \\ &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ &= A_0 e^{-\lambda t}. \end{aligned}$$

Koska $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, niin $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$ ja aktiivisuuden muutosta kuvaava lauseke voidaan kirjoittaa muotoon $A = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

Radioaktiivisten ydinten lukumäärän muuttuminen on siten muotoa $N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.

Esimerkki 1

Cesiumisotooppi $^{137}_{55}\mathrm{Cs}$ on beeta-aktiivinen ja sen puoliintumisaika on 30,2 vuotta. Cesium-näytteen massa on 1,0 grammaa.

a) Laske hajoamisvakio.

b) Kuinka monta ydintä hajoaa 1,0 minuutin aikana?

c) Mikä näytteen aktiivisuus on?

d) Kuinka suuri näytteen aktiivisuus on, kun cesiumytimistä on hajonnut 90 %?

Ratkaisu

a) Hajoamisvakio λ on

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{30{,}2\ \mathrm{a}} = \frac{\ln 2}{30{,}2 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\ \mathrm{s}}$$

$$= 7{,}2779976 \cdot 10^{-10}\ \frac{1}{\mathrm{s}} \approx 7{,}3 \cdot 10^{-10}\ \frac{1}{\mathrm{s}}.$$

b) Lasketaan, kuinka monta ydintä on näytteessä, jonka massa on m.
Ydinten lukumäärä on

$$N = nN_\mathrm{A} = \frac{m}{M} N_\mathrm{A}.$$

Aikavälillä Δt hajoavien ydinten lukumäärä on

$$\Delta N = \left| -\lambda N \Delta t \right| = \lambda \frac{m}{M} N_\mathrm{A} \Delta t.$$

Yhdessä minuutissa hajoavien ydinten lukumäärä on

$$\Delta N = 7{,}2779976 \cdot 10^{-10}\ \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot \frac{1{,}0\ \mathrm{g}}{136{,}9071\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\mathrm{mol}} \cdot 60\ \mathrm{s}$$

$$= 1{,}920143 \cdot 10^{14} \approx 1{,}9 \cdot 10^{14}.$$

c) Aktiivisuus

$$A = \lambda N = \lambda \frac{m}{M} N_A$$

$$= 7{,}2779976 \cdot 10^{-10}\ \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot \frac{1{,}0\ \mathrm{g}}{136{,}9071\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\mathrm{mol}}$$

$$= 3{,}200239 \cdot 10^{12} \approx 3{,}2 \cdot 10^{12}.$$

d) Kun ytimiä on hajonnut 90 %, jäljellä on 10 % alkuperäisistä radioaktiivisista ytimistä eli $N = 0{,}1N_0$. Aktiivisuus tällöin on

$$A = \lambda N$$
$$= 0{,}1 \cdot \lambda N_0$$
$$= 0{,}1 \cdot A_0$$
$$= 0{,}1 \cdot 3{,}20034 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Bq}$$
$$= 0{,}320034 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Bq} \approx 0{,}32 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Bq}.$$

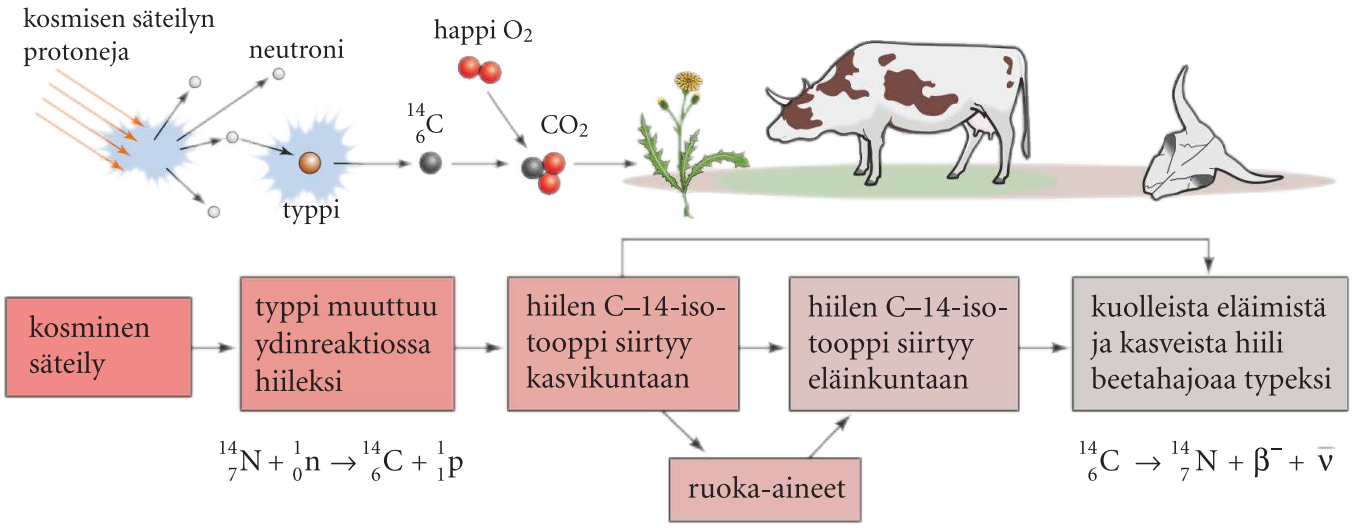
Vastaus

a) Hajoamisvakio on $7{,}3 \cdot 10^{-10}\ 1/\mathrm{s}$.

b) Minuutissa hajoaa $1{,}9 \cdot 10^{14}$ ydintä.

c) Alussa aktiivisuus on $3{,}2 \cdot 10^{12}$ Bq.

d) Aktiivisuus on $0{,}32 \cdot 10^{12}$ Bq.



◀ Radiohiili kulkeutuu kasveihin ja eläimiin hengitysilmassa ja ravinnossa. Radiohiilen perusteella voidaan määrittää eläin- ja kasvijäänteiden ikä.

Esimerkki 2

Arkeologisissa kaivauksissa löydetystä puisesta metsästysvälineestä otettiin näyte, jossa ^{14}C-aktiivisuus oli 27 Bq. Radiohiilen puoliintumisaika on 5 730 vuotta. Puulaji tunnistettiin ja kasvavasta samanmassaisesta puunäytteestä mitattiin radiohiilen aktiivisuudeksi 34 Bq. Kuinka vanha metsästysväline mahdollisesti oli?

Ratkaisu

Aktiivisuus muuttuu ajan funktiona lausekkeen $A = A_0 e^{-\lambda t}$ mukaisesti.

Ratkaistaan tästä näytteen hajoamisen aika

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln\frac{A}{A_0} = \ln e^{-\lambda t} = -\lambda t \cdot \ln e = -\lambda t$$

$$t = \frac{\ln\dfrac{A}{A_0}}{-\lambda}$$

Koska $T_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$,

saadaan

$$t = \frac{\ln\dfrac{A}{A_0}}{-\dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}}$$

$$= \frac{\ln\dfrac{27\,\text{Bq}}{34\,\text{Bq}}}{-\dfrac{\ln 2}{5\,730\,\text{a}}} = 1905{,}6567\,\text{a} \approx 1900\,\text{a}.$$

Vastaus

Metsästysväline on noin 1900 vuotta vanha.

Tehtäviä ➢ 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24

5.3 Säteilyn mittaaminen ja säteilyturvallisuus

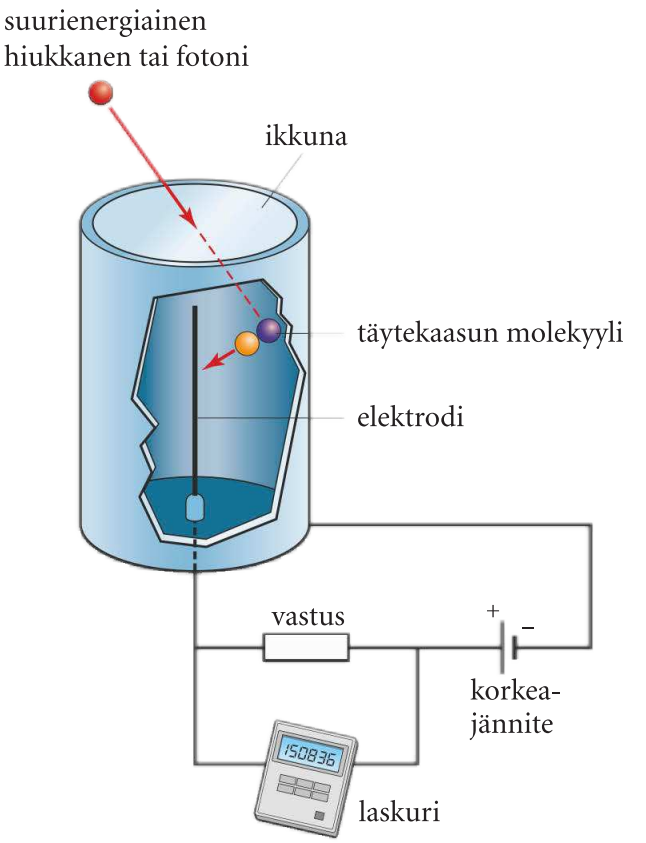
Radioaktiivisten aineiden lähettämä säteily pystytään havaitsemaan ja mittaamaan säteilyn aiheuttaman ionisaation perusteella. Ionisoituminen väliaineessa aiheuttaa mitattavan sähköisen signaalin.

Ihmisen aistit eivät pysty havaitsemaan hiukkassäteilyä eivätkä lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Yksinkertaisin tapa havaita säteilyä on asettaa fluoresoiva levy säteilysuihkun eteen. Säteily synnyttää fluoresoivassa aineessa näkyvää valoa.

Säteilyilmaisimet

Geigerputki on kaasutäytteinen säteilyilmaisin. Sen rakenne on esitetty oheisessa kuvassa. Sylinterin muotoinen johtava kuori ja keskellä oleva vastuslanka ovat elektrodit, joiden välillä on suuri tasajännite. Kun sylinterin sisälle menee ionisoivaa säteilyä (α- tai β-hiukkanen tai γ-kvantti), se ionisoi täytekaasun molekyylejä.

Täytekaasuun syntyneet ionit saavat sähkökentässä suuren nopeuden ja pystyvät ionisoimaan lisää täytekaasun molekyylejä. Syntyy ionivyöry, joka aiheuttaa sähkövirtapulssin, jonka laskuri havaitsee. Geigerputki ei pysty purkauksen aikana eikä heti sen jälkeen havaitsemaan uutta hiukkasta tai fotonia.



▲ **Geigerputkella voidaan havaita ionisoivia hiukkasia ja gammakvantteja ja laskea niiden aiheuttamien jännitepulssien lukumäärä. Johtavan vaipan ja keskellä olevan positiivisen elektrodilangan välillä on tasajännite. Putken täytekaasuna käytetään yleensä argonia tai heliumia.**

Säteilyalttiissa olosuhteissa työskentelevien henkilöiden säteilyannoksia seurataan henkilökohtaisilla annosmittareilla eli **dosimetreillä**. Säteilyannoksen seuraamiseen voidaan käyttää esimerkiksi filmiä ja puolijohdekomponenttiin tallennettua sähkövarausta.

▶ **Filmidosimetrissa gamma- tai hiukkassäteily aiheuttaa filmiin mustuman, jonka määrä on verrannollinen filmiin absorboituneeseen säteilyannokseen. Kuvassa on radonmittauspurkki. Sitä pidetään asunnossa kaksi kuukautta, jonka jälkeen purkin sisällä oleva filmi analysoidaan säteilyturvakeskuksessa.**

Säteilyyn liittyvät suureet ja niiden yksiköt

Säteilysuureet kuvaavat ionisoivan säteilyn vaikutuksia aineessa. Näitä suureita tarvitaan esimerkiksi määritettäessä säteilyannoksia ja verrattaessa, miten eri säteilylajit vaikuttavat ihmisen eri kudoksiin.

Seuraavassa määritellään lyhyesti tärkeimmät säteilysuureet.

◀ Säteilytyötä tekevien henkilöiden säteilyannosten seuraamiseen käytetään dosimetrejä. Dosimetri voidaan kiinnittää esimerkiksi rintataskuun tai ranteeseen.

Suure	Tunnus	Luonnehdinta	Yksikkö
Absorboitunut annos	D	Mittaa ionisoivan säteilyn aineeseen luovuttaman energian ΔE määrää massayksikköä Δm kohden, $D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$.	gray, Gy 1 Gy = 1 J/kg
Ekvivalenttiannos	H	Eri säteilylaadut tehdään samanarvoisiksi (ekvivalenteiksi), kun otetaan huomioon, mitkä ovat eri säteilylajien biologiset vaikutukset kudoksiin. Kun absorboitunut annos D kerrotaan säteilyn säteilylajista riippuvalla laatukertoimella Q_T, saadaan ekvivalenttiannos $H = Q_T D$. Ekvivalenttiannoksen avulla voidaan arvioida, millaisia haittavaikutuksia säteily aiheuttaa tarkasteltavassa kudoksessa tai elimessä.	sievert, Sv 1 Sv = 1 J/kg
Efektiivinen annos	E	Koko kehon saama säteilyannos. Jokaisen kudoksen saama ekvivalenttiannos kerrotaan kudoksen painotuskertoimella ja saadut arvot lasketaan yhteen. Suomalaisen saama keskimääräinen efektiivinen annos on noin 4 mSv.	sievert, Sv

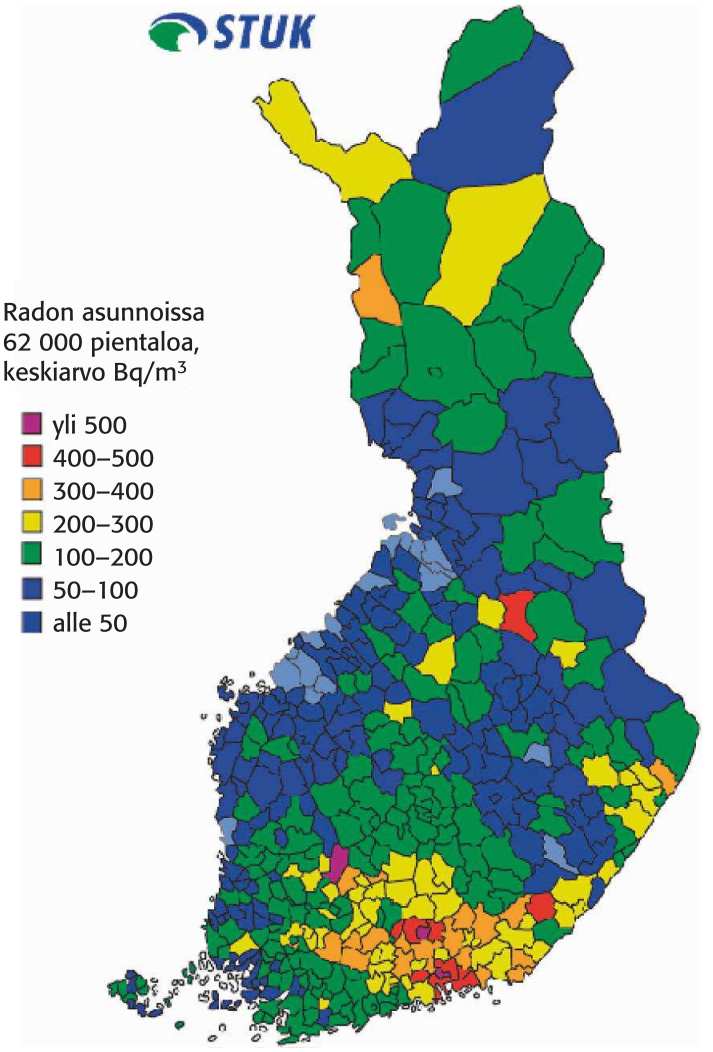
Laatukertoimet eri säteilylajeille

Säteilylaji	Laatutkerroin Q_T
röntgen, γ-, β^+- ja β^-- säteily	1
hitaat neutronit	3
nopeat neutronit, protonit	10
α- säteily	20

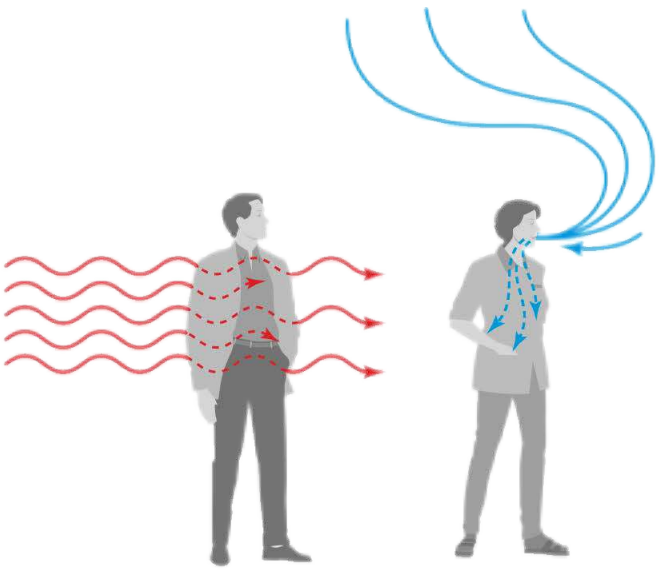
▶ DIS-dosimetri (*Direct Ion Storage*) on annosmittari, jonka puolijohdekomponentin muistiin on tallennettu sähkövaraus. Säteilyn aiheuttama ionisaatio purkaa tätä sähkövarausta. Mittaria luetaan niin, että jäljellä olevaa sähkövarausta verrataan alun perin muistiin tallennettuun sähkövaraukseen. Kertynyt säteilyannos voidaan lukea mittarista milloin tahansa.

Säteily ja ihminen

Radioaktiivisuus ja ionisoiva säteily ovat aina kuuluneet ihmisen elinympäristöön. Meihin kohdistuu jatkuvasti säteilyä, jota tulee sekä kehon ulkopuolelta että kehon sisältä.



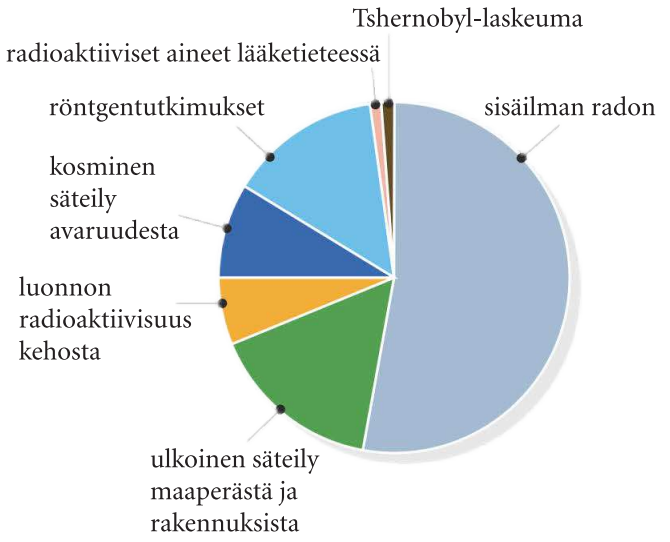
▲ **Noin puolet suomalaisten saamasta säteilyannoksesta on peräisin huoneilman radonista. Keskimääräinen radonpitoisuus suomalaisissa asunnoissa on noin 120 becquereliä kuutiometrissä. Se vastaa noin kahden millisievertin säteilyannosta vuodessa. Kartassa on esitetty radonpitoisuuksien keskiarvoja suomalaisissa pientaloissa eri osissa maata Säteilyturvakeskuksen mittausten mukaan. Suomen radonvaltaisimmat alueet ovat Itä-Uusimaa, Kymenlaakso, Päijät-Häme ja Pirkanmaa. Kaikkein tehokkaimmin vähennettäisiin suomalaisten keskimääräistä säteilyannosta pienentämällä huoneilman radonpitoisuutta.**



▲ **Ulkoinen säteily tulee pääasiassa maaperästä. Hengitysilman ja ruoan mukana kehoon joutuneet α- ja β-aktiiviset hiukkaset ovat sisäisenä säteilylähteenä erityisen haitallisia.**

Ulkoinen säteily tulee pääasiassa maaperän pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden ^{238}U- ja ^{232}Th-hajoamissarjojen isotoopeista. Uraanisarjaan kuuluva radonisotooppi ^{222}Rn aiheuttaa joillakin Suomen alueilla noin puolet henkilön saamasta säteilyannoksesta. Radonpitoisuuksien erot paikkakunnittain ovat suuret. Radon on jalokaasu, jota siirtyy maaperästä kaivoveteen ja asuntoihin. Asuntojen, työpaikkojen ja porakaivovesien radonpitoisuudet ovat Suomessa maailman korkeimpia.

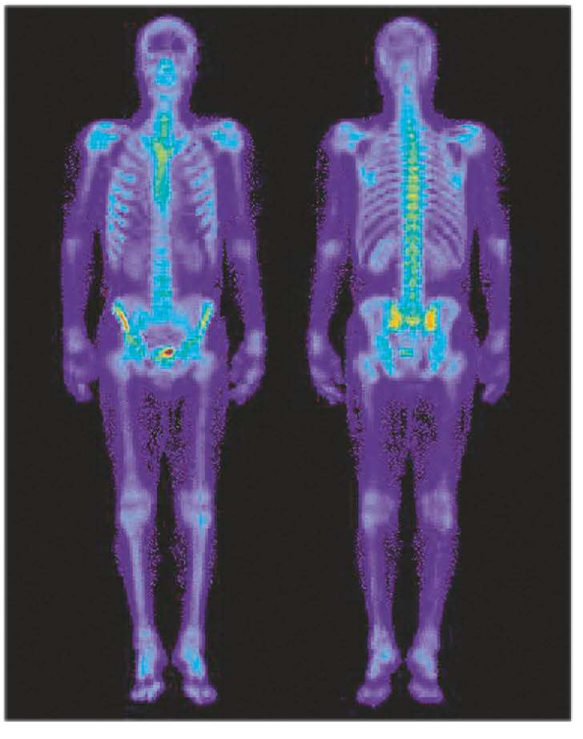
Sisäinen säteily on ihmisen kehon sisältä tulevaa säteilyä. Tällöin radioaktiivisia aineita on joutunut kehoon esimerkiksi hengityksen tai ruoan mukana. Kalium-40 on tyypillinen säteilylähde, jota esiintyy kaikissa luonnon kaliumyhdisteissä, myös ihmisen luustossa ja kudoksissa. Radonin hajoamistuotteena syntyvät poloniumisotoopit ^{218}Po ja ^{214}Po kiinnittyvät helposti hengitysilmassa oleviin pieniin pölyhiukkasiin ja kulkeutuvat keuhkoihin. Keuhkojen säteilyrasitus aiheutuu suurelta osin sinne joutuneiden aktiivisten hiukkasten lähettämistä α-hiukkasista.



▲ **Suomalaiset saavat säteilyä pääasiassa luonnosta ja röntgentutkimuksista. Luonnon radioaktiivisia aineita siirtyy elimistöön ruoan, juoman tai hengityksen mukana. Ihmisten saama säteilymäärä vaihtelee paljon.**

Säteilyn lääketieteellinen käyttö

Säteilylääketieteessä teknetium (^{99}Tc), kobolti (^{60}Co) ja jodi (^{131}I) ovat yleisimmin käytetyt isotoopit. Niitä käytetään merkkiaineena kuvauksissa, ja niillä tuhotaan syöpähoidossa kasvaimia. Suurimman altistuksen säteilyn lääketieteellisestä käytöstä ihmiset saavat röntgentutkimuksissa.

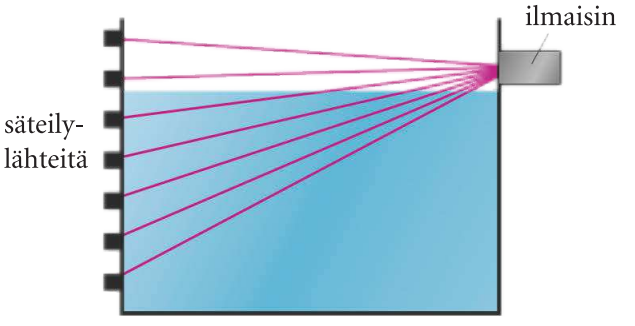


▲ **Isotooppikuvauksessa potilaalle annetaan ainetta, joka on merkitty radioaktiivisella isotoopilla. Merkkiaineen puoliintumisaika on tyypillisesti alla 2 tuntia. Merkkiaine kulkeutuu haluttuun elimeen, ja aineen kulkua seurataan sen lähettämän säteilyn perusteella.**

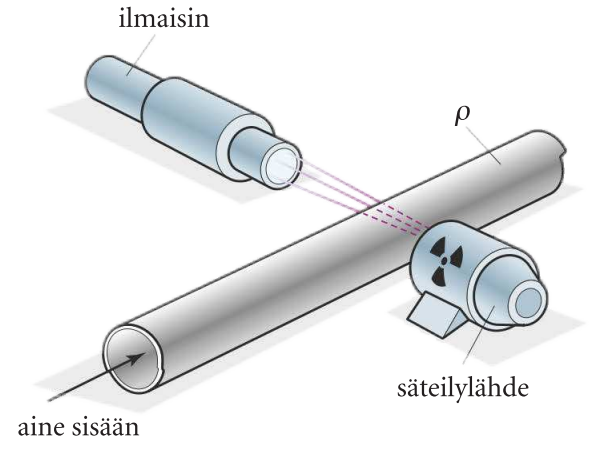
Säteilyn käyttö teollisuudessa

Laadunvalvonnan erinomainen tutkimusmenetelmä on **radiografia**. Kappaletta ei tarvitse rikkoa, vaan gamma- tai röntgensäteily kohdistetaan siihen. Kappaleen taakse on asetettu röntgenfilmi, jossa kappaleen tiheysvaihtelut näkyvät tummuuden vaihteluina. Radiografia on hyvä menetelmä tutkia valutuotteiden sekä hitsaussaumojen virheettömyyttä esimerkiksi laivoissa, silloissa, paineastioissa ja lentokoneissa.

Radiografian avulla mitatulla tiheydellä voidaan tarkkailla muun muassa virtauksia erilaisissa teollisuusprosesseissa. Mittaus ei häiritse mitattavaa kohdetta, virtausta. Radiograafinen tiheysmittaus perustuu säteilyn vaimenemiseen mitattavassa väliaineessa. Vaimenemisen voimakkuus riippuu aineen koostumuksesta ja mittauksessa käytettävän säteilyn energiasta. Tiheyden mittaamisen lisäksi radiograafisia mittauksia voidaan käyttää myös paksuusmittauksiin esimerkiksi paperiteollisuudessa ja mattoteollisuudessa.

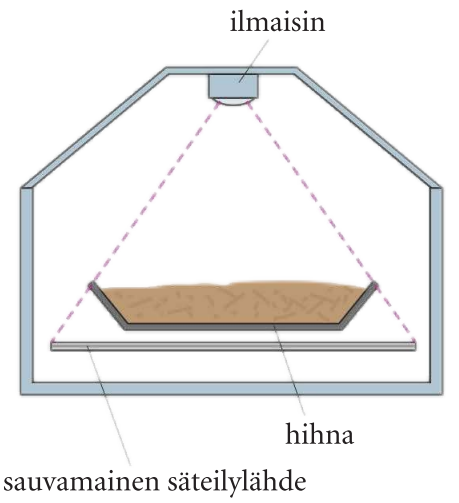


◀ **Säteilyilmaisimia voidaan käyttää myös nestepinnan korkeusmittareina. Kuvassa on esitetty yksi mittauksen toteuttamisvaihtoehto. Mitä alemmaksi nesteen pinta laskee, sitä suurempi ilmaisimen mittaama säteilyn intensiteetti on.**



▲ **Prosessiteollisuudessa käytetään säteilyyn perustuvia mittauksia silloin, kun olosuhteet ovat vaativat: vallitsee korkea lämpötila, räjähdysvaara tai prosessissa on mukana syövyttäviä aineita. Kuvassa on esitetty siirtyvän aineen tiheyden mittauksen periaate. Säteily heikkenee putken läpi kulkiessaan sitä enemmän, mitä tiheämpää putkessa virtaava aine on.**

▶ Materiaalivirran seuraaminen hihnakuljettimella. Aineen massa voidaan laskea läpipäässeen säteilyn intensiteetin perusteella, kun aineen tiheys ja matka säteilylähteestä ilmaisimeen pysyvät vakiona.



▶ Muun muassa ihmisten laitonta salakuljetusta pyritään estämään läpivalaisemalla rekka-autot tulliasemalla.

Säteilyturvallisuus

Suomessa säteilyvalvonta ja siihen liittyvä tutkimus- ja tarkastustoiminta kuuluvat Säteilyturvakeskukselle STUK:lle. STUK:n toimintaa ja radioaktiivisten aineiden käyttöä ohjaa suomalainen säteilylainsäädäntö, joka perustuu kansainvälisiin suosituksiin.

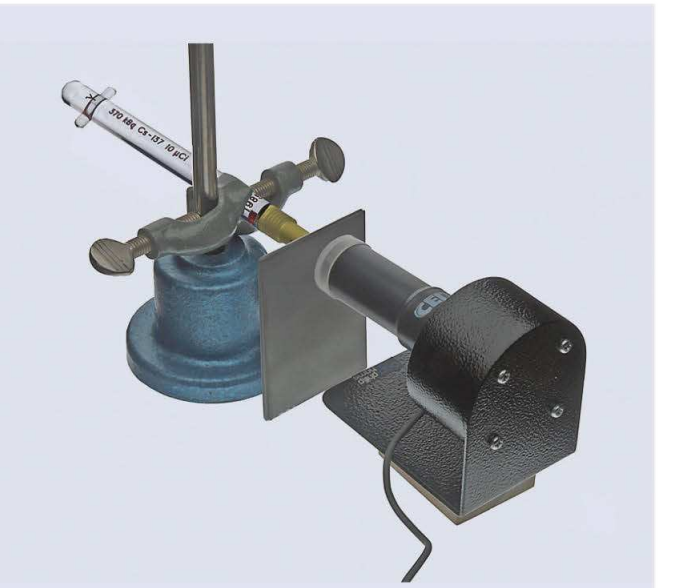
Annosrajat on säädetty siten, että säteilyn aiheuttama riski on vähäinen verrattuna muihin riskeihin, joita ihmiset kohtaavat. Säteilytyöntekijöiden enimmäisannosrajoiksi säteilyasetuksessa on seuraavia säädöksiä:

- Efektiivinen annos ei saa ylittää 20 mSv:n keskiarvoa viidessä vuodessa. Säteilyannos ei saa ylittää 50 mSv:ä vuodessa.
- Silmän mykiön ekvivalenttiannos ei saa olla suurempi kuin 150 mSv vuodessa eikä käsien, jalkojen tai ihon saama ekvivalenttiannos saa olla vuodessa korkeampi kuin 500 mSv.

Säteilyn biologiset vaikutukset riippuvat siitä, kuinka suurille säteilyannoksille kudos altistuu. Suojelutoimien pitää rajoittaa säteilyannokset mahdollisimman pieneksi. Ionisoivalta säteilyltä suojautuminen onnistuu yleensä varsin yksinkertaisesti.

- **Rajataan oleskeluaika** mahdollisimman lyhyeksi säteilyalueella, koska säteilyannos riippuu ajasta.
- **Lisätään etäisyyttä**, koska säteilylähteen ja ihmisen välisen etäisyyden kasvattaminen pienentää säteilyn intensiteettiä ($I \sim \frac{1}{r^2}$).
- **Käytetään suojarakenteita**, koska säteilylähteen ja ihmisen välissä oleva väliaine suojaa säteilyltä.

Gammasäteilyn heikkeneminen



Tutki & kokeile

Tutki gammasäteilyn vaimenemista eri aineissa.

1. Aseta säteilylähteen ja geigermittarin väliin kerroksittain
   a) paperia,
   b) alumiinifolioita ja
   c) lyijylevyjä.
2. Miten säteily vaimenee näissä aineissa?
3. Kuinka paksu kerros kutakin näistä on laitettava, jotta gammasäteily vaimenee taustasäteilyn tasolle?

Gammasäteilyn fotoni absorboituu aineeseen yleensä yhdessä vuorovaikutustapahtumassa. Parinmuodostuksessa ja valosähköilmiössä häviää aina yksi fotoni, ja Comptonin sironnassa fotonin energia ja liikesuunta muuttuvat. Näiden vuorovaikutusten kautta gammasäteilyn intensiteetti heikkenee väliaineessa eksponentiaalisesti.

Säteilyn heikennyslaki

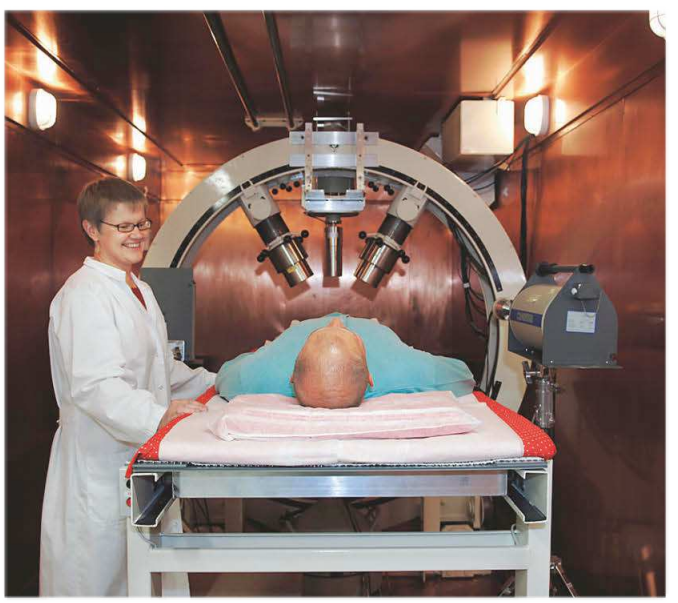
$I = I_0 e^{-\mu x}$,

jossa

- I_0 on väliaineeseen osuneen gammasäteilyn intensiteetti,
- I gammasäteilyn intensiteetti, kun säteily on kulkenut väliaineessa matkan x ja
- μ säteilyn energiasta ja väliaineesta riippuva heikennyskerroin.

Heikennyskertoimen yksikkö on $[\mu] = \frac{1}{\text{m}}$.

Sitä ainekerroksen paksuutta, joka heikentää säteilyn intensiteetin puoleen, sanotaan **puoliintumispaksuudeksi** $d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$. Puoliintumispaksuus kuvaa gammasäteilyn absorboitumista aineeseen. Esimerkiksi puoliintumispaksuus säteilylle, jonka fotonien energia on 5 MeV, on ilmassa 170 cm, vedessä 23 cm ja lyijyssä 14 mm.



◀ **Potilasta valmistellaan gammatykin alle.**

Esimerkki 1

Gammasäteilylähde, jonka lähettämän fotonin energia 0,60 MeV, on varastoitu lyijylaatikkoon. Kuinka paksu laatikon seinän tulee olla, jotta sen läpi pääsisi vain 5,0 % sen sisäpintaan kohdistuvasta säteilystä? Lyijyn heikennyskerroin tälle säteilylle on 142 1/m.

Ratkaisu

Laatikon sisäpintaan kohdistuvan säteilyn intensiteetti on I_0, ja intensiteetti laatikon ulkopinnalla on $I = 0{,}050 I_0$. Heikennyslain $I = I_0 e^{-\mu x}$ avulla

$$0{,}050 I_0 = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\ln 0{,}050 = -\mu x \ln e$$

Ratkaistaan x

$$x = \frac{\ln 0{,}050}{-\mu}$$

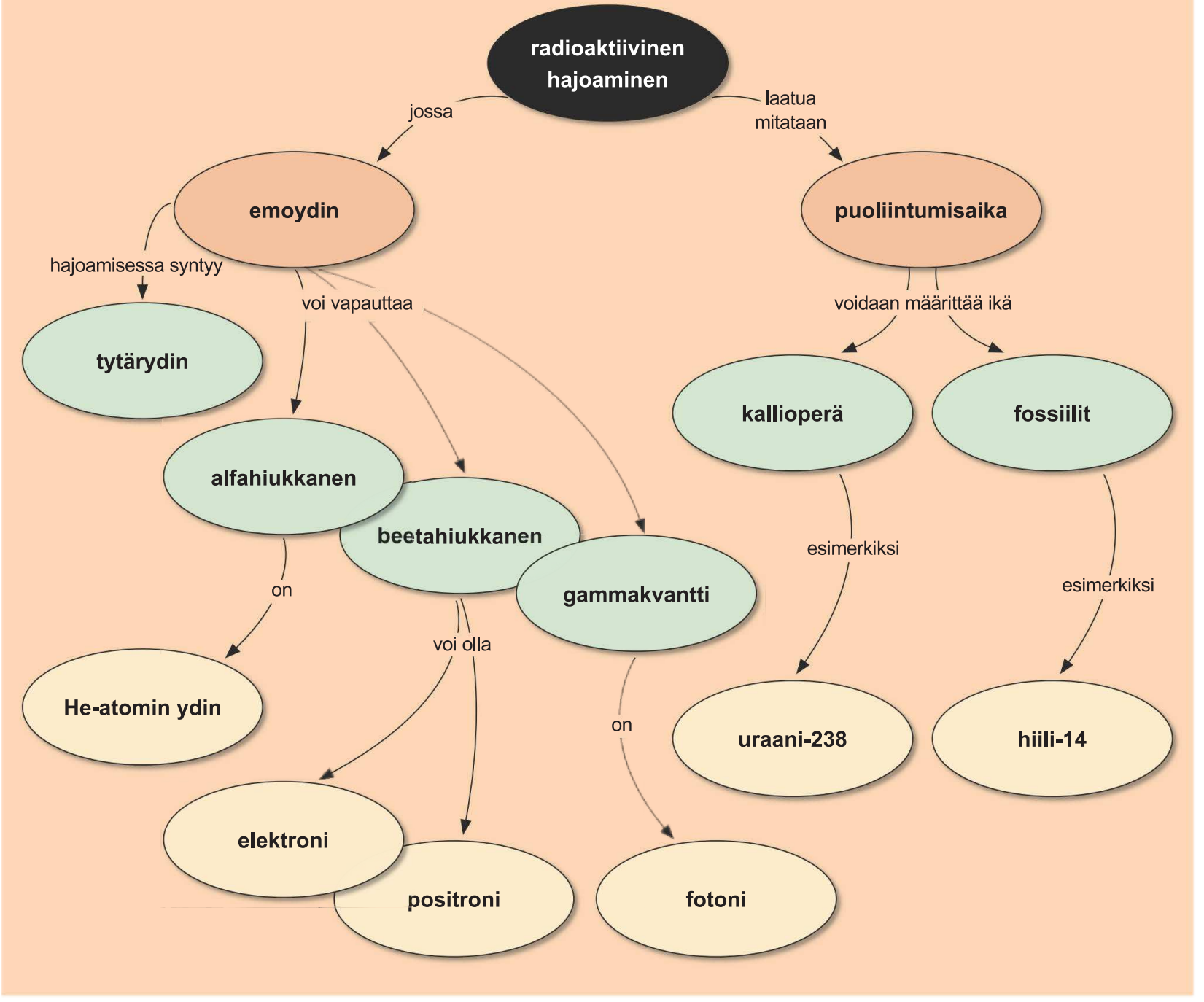
$$= \frac{\ln 0{,}050}{-142\,\frac{1}{\text{m}}}$$

$$= 0{,}021097\,\text{m} \approx 2{,}1\,\text{cm}.$$

Vastaus

Seinän paksuus on 2 cm.

YHTEENVETO



Tehtäviä ➢ 25, 26, 27, 28, 29, 30

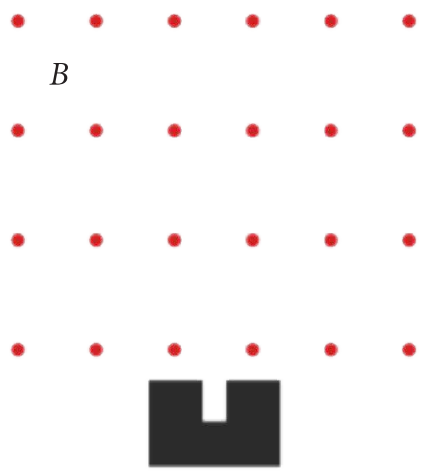
TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- ydinsäteily
- massan muutos
- hajoamisenergia
- alfahajoaminen
- beetahajoaminen
- gammasäteily
- hajoamislaki
- puoliintumisaika
- geigerputki

5.1

1. **a)** Säteilylähde, joka lähettää alfa- ja beetahiukkasia, on magneettikentässä. Piirrä hiukkasten rata, kun ne poistuvat säteilylähteestä. Perustele radan muoto.



b) Miksi gammasäteily ei muuta suuntaansa magneettikentässä?

c) Miksi radioaktiivinen aine on aina ympäristöään lämpimämpää?

d) Mistä johtuu, että Maan sisusta pysyy kuumana?

2. Täydennä reaktioyhtälöt.

a) $^{214}_{85}\mathrm{At} \rightarrow \_\_ + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) $\_\_ \rightarrow {}^{140}_{58}\mathrm{Ce} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

Kirjoita seuraavien isotooppien hajoamisyhtälöt.

c) $^{148}_{64}\mathrm{Gd}$

d) $^{229}_{90}\mathrm{Th}$

3. **a)** Radioaktiivista radonkaasua syntyy maaperässä olevan radiumin α-hajoamisessa. Kirjoita radiumisotoopin hajoamista kuvaava reaktioyhtälö.

b) Myös radonkaasu on edelleen α-aktiivinen. Kirjoita reaktioyhtälö.

c) Hassiumin ^{265}Hs- isotooppi hajoaa kolmen peräkkäisen α-hajoamisen kautta. Mikä on tämän hajoamisketjun tytärydin?

4. ^{144}Nd- isotooppi on α-aktiivinen.

a) Kirjoita hajoamisyhtälö.

Laske reaktion

b) massan muutos

c) reaktioenergia.

d) Miten reaktioenergia jakaantuu α-hiukkasen ja tytärytimen kesken, kun reaktiossa ei synny gammasäteilyä?

5. Maitopurkin kokoisessa suomalaisen peruskallion kivenmurikassa on keskimäärin 10,0 mg uraania, josta 99,3 % on $^{238}_{92}$U-isotooppia. Uraani-238-isotooppi on α-aktiivinen.

a) Kirjoita reaktioyhtälö.

b) Laske massan muutos α-hajoamisessa.

c) Laske α-hajoamisen reaktioenergia.

d) Miksi hajoamistuotteet liikkuvat reaktion jälkeen vastakkaisiin suuntiin?

e) Laske α-hiukkasen liike-energia ja lähtönopeus hajoamisen jälkeen, kun reaktiossa ei synny gammasäteilyä.

6. **a)** Mitä on beetahajoaminen?

Kirjoita seuraavat reaktioyhtälöt.

b) Tallium-isotooppi ^{208}Tl on β^--aktiivinen.

c) Typpi-isotooppi ^{13}N on β^+-aktiivinen.

7. **a)** Kirjoita β^--aktiivisen hiili-14-isotoopin hajoamisyhtälö.

b) Kirjoita β^+-aktiivisen happi-15-isotoopin hajoamisyhtälö.

8. Laske seuraavissa hajoamisreaktioissa tapahtuva massan muutos ja reaktioenergia.
a) ^{213}Bi- isotooppi on β^--aktiivinen
b) ^{39}Ca- isotooppi on β^+-aktiivinen.

9. **a)** Nuklidit ^{66}Ni ja ^{108}Ag ovat β^--aktiivisia ja ^{8}B ja ^{52}Fe β^+-aktiivisia. Kirjoita näiden nuklidien hajoamisen reaktioyhtälöt täydellisinä.
b) Hajoamisreaktiossa
$^{206}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{202}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$
reaktioenergia on 5,327 MeV.
Laske ^{202}Pb- atomin massa, kun
$m_{\mathrm{Po}} = 205{,}980427$ u ja
$m_{\mathrm{He}} = 4{,}0026033$ u.
(Yo kevät 1990, teht. 7)

10. **a)** Millainen prosessi on elektronisieppaus?
b) Koboltti ^{57}Co- ydin voi siepata elektronin elektroniverhosta. Kirjoita hajoamisreaktio. Laske elektronisieppauksen reaktioenergia.

11. Jodi ^{128}I- isotoopin hajoaminen voi tapahtua kolmella eri tavalla β^-, β^+ ja EC. Kirjoita reaktioyhtälöt.

12. Selvitä kirjan lopussa olevan nuklidikartan avulla, miksi alkuaineeksi ^{143}Xe- isotooppi hajoaa ajan kuluessa?

13. **a)** Miksi toisinaan käytetty termi ”gammahajoaminen” on virheellinen?
b) $^{226}_{88}$Ra- ydin lähettää gammafotonin, jonka aallonpituus on $8{,}67 \cdot 10^{-12}$ m. Kuinka paljon ytimen massa pienenee?
c) Miksi gammafotoni emittoituu ytimestä?

14. Kuinka suuria syntyneiden gammafotonien energiat ovat, kun annihilaatio tapahtuu
a) elektronin ja positronin välillä
b) protonin ja antiprotonin välillä?

15. Gammasäteilyn fotonista voi syntyä hiukkanen–antihiukkanen-pari. Kuinka suuri syntyneen elektroni–positroni-parin suurin yhteinen kineettinen energia on, kun γ-kvantin aallonpituus oli 0,37 pm?

16. Kirjan sivun 93 kuvassa on esitetty, miten gammafotonin absorboituminen aineeseen riippuu fotonin energiasta.
a) Selitä kuvaajan avulla, millaisia vuorovaikutustapahtumia hiiliatomilla ja thoriumatomilla on energialtaan erisuurten gammafotonien kanssa.
b) Millaisissa aineissa gammasäteily vaimenee parhaiten? Perustele vastauksesi.
c) Gammasäteilyn aallonpituus on 0,12 pm. Minkä prosessin kautta fotonit absorboituvat lyijyyn?

5.2

17. **a)** Kuinka suuri osa radioaktiivisen aineen ytimistä on jäljellä viiden puoliintumisajan jälkeen?
b) Radon ^{222}Ra:n puoliintumisaika on noin neljä vuorokautta. Kuinka pitkän ajan kuluttua radonin aktiivisuus on pienentynyt neljäsosaan?
c) Radonin puoliintumisaika on 3,82 d. Laske hajoamisvakio.

18. Jodi ^{131}I- isotoopin puoliintumisaika on 8,02 d. Kuinka pitkän ajan kuluttua näytteen aktiivisuus on pienentynyt
a) kolmasosaan,
b) sadasosaan alkuperäisestä?

19. Radioaktiivisen näytteen aktiivisuus pienenee kahdessa vuorokaudessa 425 kBq:stä 349 kBq:iin.
Laske näytteen puoliintumisaika.

20. Radiumisotoopin ^{226}Ra alfahajoamisen seurauksena syntyy radioaktiivista radonkaasua. Radiumin puoliintumisaika on 1 600 vuotta.

a) Laske hajoamisvakio.

b) Kuinka monta ydintä hajoaa 10,0 sekunnin aikana 5,0 gramman radiumnäytteessä?

c) Kuinka suuri näytteen aktiivisuus oli alussa?

d) Kuinka suuri näytteen aktiivisuus on, kun radiumytimiä on hajonnut 75 %?

21. Sädehoitoon käytetään muun muassa jodin radioaktiivista ^{128}I- isotooppia, jonka puoliintumisaika on 25,0 min. Hoitojakson alkaessa ^{128}I- näytteen massa on 3,0 ng.

a) Kuinka suuri näytteen aktiivisuus tällöin on?

b) Kuinka suuri näytteen aktiivisuus on 2 h 45 min:n kuluttua?

22. Hopea ^{106}Ag- isotooppi on β^+- aktiivinen. Hopeanäytteen säteilyä seurattiin geigerlaskurilla mittaamalla 20 sekunnissa kertynyt pulssimäärä ajan funktiona seuraavan taulukon mukaisesti.

aika (min)	0	10	20	30	40	50	60
pulssimäärä	22 436	16 808	12 591	9 433	7 066	5 294	3 966

aika (min)	70	80	90	100	110	120	130	140
pulssimäärä	2 971	2 225	1 667	1 249	935	701	525	393

a) Kirjoita hopeaisotoopin hajoamisreaktio.

b) Esitä graafisesti pulssimäärän logaritmi ajan funktiona ja määritä kuvan avulla isotoopin puoliintumisaika.

23. Tšernobylin ydinvoimaonnettomuuden tapahtuessa 26.4.1986 reaktorisydämeen oli kertynyt uraanin halkeamistuotteena mm. 100 kg cesiumisotooppia ^{137}Cs ja 5 kg isotooppia ^{134}Cs. Onnettomuuden seurauksena kummankin isotoopin kokonaismäärästä 13 % pääsi ilmakehään ja levisi pääasiassa eri puolille Eurooppaa. Laske ^{137}Cs- ja ^{134}Cs- päästöjen kokonaisaktiivisuudet päästöhetkellä ja tänään. ^{137}Cs:n puoliintumisaika on 30,2 a ja ^{134}Cs:n 2,1 a. (Yo kevät 1991, teht. 7).

24. **a)** Radiohiiliajoituksen periaate.

b) Arkeologisesta löydöstä otetun 1,0 g massaisen hiilinäytteen aktiivisuudeksi mitataan 7 525 Bq. Kuinka vanha näyte oli, kun tuoreesta puusta saadun 1,0 g hiilinäytteen keskimääräinen aktiivisuus on 20 200 Bq.

5.3

25. Perustele lyhyesti, mitkä seuraavista väitteistä pitävät paikkansa ja mitkä eivät:

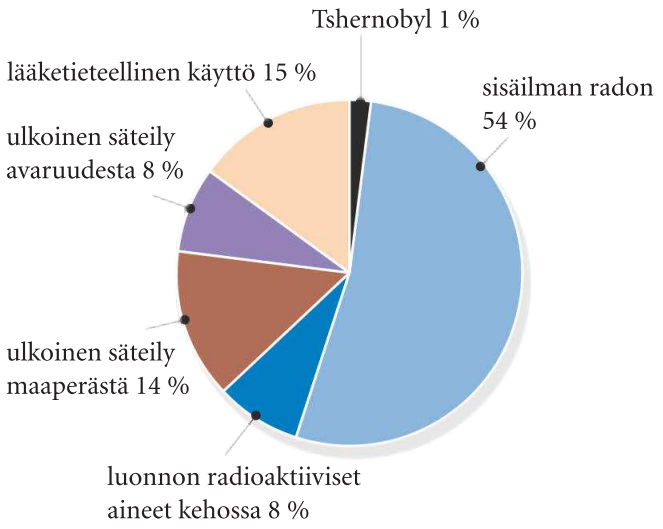
a) Luonnossa on aina jonkin verran ionisoivaa (”radioaktiivista”) säteilyä.

b) Röntgenkuvia otettaessa voidaan säteilylle herkkiä elimiä suojata lyijylevyillä.

c) Radonytimistä lähtevät α-hiukkaset voivat kulkeutua tuulen mukana pitkiäkin matkoja.

d) Pääasiallinen syy ydinjätteen sijoittamiseen yli puolen kilometrin syvyyteen kallioperään on se, että jätteestä lähtevä säteily vaimenee kallioon. (Yo kevät 2003, teht. 1)

26. Ihminen altistuu ionisoivalle säteilylle jatkuvasti ainakin vähäisessä määrin. Oheinen diagrammi esittää suomalaisten vuosittain saaman keskimääräisen säteilyannoksen jakautumista eri säteilylähteiden osalle.



a) Mitä tarkoitetaan ionisoivalla säteilyllä? Tee selkoa sen eri lajeista.

b) Kerro lyhyesti kolmen kuvassa mainitun lähteen säteilevistä aineista ja/tai säteilyn laadusta. (Yo kevät 2004, teht. 1)

27. **a)** Verraten yleisen käsityksen mukaan radioaktiivinen aine on säteilyturvallisuuden kannalta sitä hankalampaa, mitä pidempi on radioisotoopin puoliintumisaika. Kommentoi käsityksen paikkansapitävyyttä.

b) Persianlahden ja Kosovon sodissa käytettiin panssarintorjunta-ammuksia, joiden läpäisykärki oli lähes puhdasta ^{238}U- isotooppia. Tämän isotoopin, ”köyhdytetyn uraanin”, puoliintumisaika on $4{,}47 \cdot 10^9$ a. Oletetaan, että tällainen läpäisykärki leviää räjähdyksessä pölynä ilmaan. Laske yhteen kuutiometriin ilmaa sisältyvä ^{238}U- aktiivisuus, jos uraania on ilmassa 10 mg/m^3. (Yo syksy 2001, teht. 13.)

28. Radioaktiivista näytettä tutkittiin geigerlaskurilla. Laskentataajuus pieneni arvosta 825 1/min arvoon 520 1/min ajassa 20 min. Taustasäteilystä johtuva keskimääräinen laskentataajuus samalla ilmaisimella mitattuna oli 110 1/min.

a) Mistä taustasäteily voi olla peräisin?

b) Kuinka suuri on tutkitun isotoopin puoliintumisaika? (Yo syksy 1994, teht. 7)

29. **a)** Mitä säteilymittauksen yksikkö Bq (becquerel) tarkoittaa?

b) Miten yksikkö Sv (sievert) eroaa becquerellista?

c) Säteilyvuodon jälkeen maidossa havaittiin ^{131}I- isotooppia, jonka aktiivisuudeksi mitattiin 8,65 kBq/l. Maitoa säilytettiin eristetyssä, kylmässä tilassa kaksi viikkoa. Voiko maitoa tämän jälkeen käyttää, jos hylkäysrajana pidetään 2,0 kBq/l?

30. **a)** Gammasäteilijä lähettää säteilyä, jonka energia on 190 keV. Kuinka paksu lyijykerros tarvitaan, jotta säteilyn intensiteetti pienenee 90 %. Lyijyn heikennyskerroin täällä energia-alueella on 10,15 l/m.

b) Miten paksu lyijystä valmistettu säteilysuoja tarvitaan, jotta läpipäässeen säteilyn intensiteetti olisi 0,1 % alkuperäisestä?

6 Ydinreaktiot

Auringon kaltaisissa tähdissä syntyy fuusioreaktioissa alkuaineita rautaan Fe saakka. Supernovissa syntyy raskaampia alkuaineita. Fuusio on mahdollisesti tulevaisuuden energian tuotantotapa.

Tässä luvussa tutustutaan keinotekoisiin ydinreaktioihin, fissioon ja fuusioon. Luvussa tarkastellaan myös ydinenergian tuottoa erilaisissa voimalaitoksissa. Lopuksi tarkastellaan tähtien ydinreaktioita.

▲ **Uraanipitoista malmia löytyy eripuolilta maapalloa. Kuvassa on uraanikaivos Kanadasta. Afrikassa Gabonissa (Oklo) on löydetty alue, jossa on ollut riittävästi uraania aikaansaamaan luonnollisen fissioreaktorin. Tämä luonnon ydinvoimalaitos on toiminut 1,7 miljardia vuotta sitten.**

6.1 Ydinreaktiotyypit

Ytimien spontaania hajoamista kutsutaan **fissioksi** ja ydinten yhteenliittymistä **fuusioksi**.

Keinotekoinen ydinreaktio saadaan aikaiseksi, kun kohdistetaan hiukkassuihku kohdeaineeseen. Hiukkassuihkun hiukkaset (protonit, neutronit tai kevyet ytimet) tunkeutuvat suurella nopeudella hyvin lähelle kohdeaineen atomien ytimiä, jolloin ne vuorovaikuttavat niiden kanssa, tuloksena saattaa olla keinotekoinen ydinreaktio. Ensimmäinen keinotekoinen ydinreaktio toteutettiin, kun Rutherford pommitti typpiytimiä $^{14}_{7}\mathrm{N}$ alfahiukkasilla.

Keinotekoinen ydinreaktio

Keinotekoinen fissio, fuusio tai jonkin isotoopin muuttuminen toiseksi isotoopiksi voidaan saada aikaan pommittamalla ainetta hiukkasilla.

Ydinreaktion energia

Ydinreaktioita voidaan kuvata reaktioyhtälöillä. Jos ydinreaktiossa emoydin eli lähtöydin on X ja ammushiukkanen a sekä syntynyt hiukkanen b ja tytärydin Y, reaktioita esittää reaktioyhtälö

$$\mathrm{X} + \mathrm{a} \rightarrow \mathrm{b} + \mathrm{Y}$$

tai

$$\mathrm{X(a, b)Y}.$$

Rutherfordin käyttämää typpiydinten ja alfahiukkasten välistä reaktiota voidaan kuvata reaktioyhtälöllä

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}$$

tai merkinnällä

$$^{14}_{7}\mathrm{N}(\alpha, \mathrm{p})^{17}_{8}\mathrm{O}\,.$$

Ydinreaktion massan muutos on lähtöhiukkasten ja syntyvien hiukkasten massojen erotus. Ydinreaktiossa vapautuva tai sitoutuva energia, reaktioenergia, saadaan selville, kun lasketaan reaktion massan muutosta vastaava energia lausekkeen $E = mc^2$ avulla.

Ydinreaktion energia

Reaktion $\mathrm{X} + \mathrm{a} \rightarrow \mathrm{b} + \mathrm{Y}$ reaktioenergia on

$$Q = (m_\mathrm{X} + m_\mathrm{a} - m_\mathrm{b} - m_\mathrm{Y})c^2\,,$$

jossa

m_X on ytimen X massa,
m_a on hiukkasen a massa,
m_b on hiukkasen b massa,
m_Y on ytimen Y massa ja
c on valonnopeus.

Reaktioenergia voi olla positiivinen tai negatiivinen.

1. Jos reaktioenergia on positiivinen ($Q > 0$), reaktiossa vapautuu energiaa. Tällöin lähtöaineiden massa on suurempi kuin tuotteiden massa. Reaktio on **eksoerginen**. Reaktiossa vapautuva energia on syntyvien hiukkasten liike-energiana tai syntyvien säteilykvanttien energiana.
2. Jos taas reaktioenergia on negatiivinen ($Q < 0$), reaktio vaatii energiaa. Tällöin tuotteiden massa on suurempi kuin lähtöaineiden massa. Reaktio on **endoerginen**. Reaktion vaatima energia saadaan esimerkiksi ammushiukkasten liike-energiasta.

Esimerkki 1

Kuinka suuri on reaktion $^{14}_{7}\mathrm{N}(\alpha,\mathrm{p})\,^{17}_{8}\mathrm{O}$ reaktioenergia?

Ratkaisu

Reaktion $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}$ reaktioenergia on

$$\begin{aligned} Q &= (m_\mathrm{N} + m_\mathrm{He} - m_\mathrm{p} - m_\mathrm{O})c^2 \\ &= (14{,}0030740\ \mathrm{u} + 4{,}0026033\ \mathrm{u} \\ &\quad - 1{,}0072765\ \mathrm{u} - 16{,}999131\ \mathrm{u})c^2 \\ &= -7{,}302 \cdot 10^{-4} \cdot c^2 \\ &= -7{,}302 \cdot 10^{-4} \cdot 931{,}5\ \mathrm{MeV} \\ &= -0{,}6802\ \mathrm{MeV} \approx -0{,}68\ \mathrm{MeV}. \end{aligned}$$

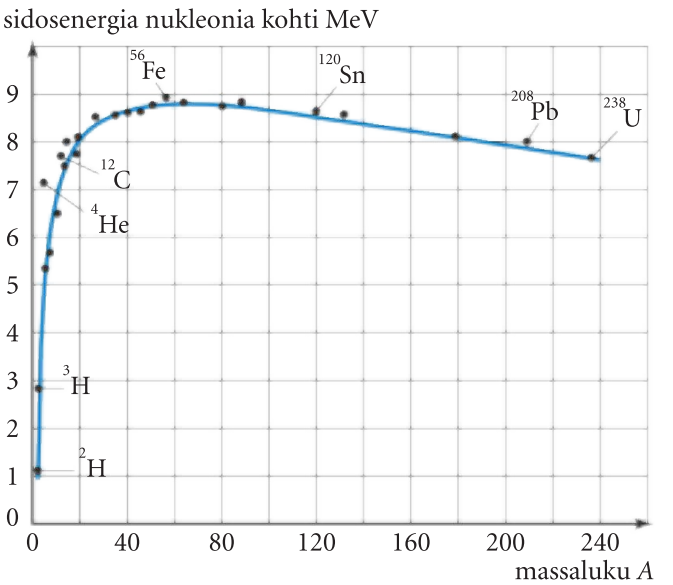
Vastaus

Reaktioenergia on –0,68 MeV. Koska reaktioenergia on negatiivinen, reaktio on endoerginen. Reaktio ei tapahdu itsestään vaan vaatii ulkopuolista energiaa, joka saadaan alfahiukkasen liike-energiasta.

Ydinfissio

Raskaan ytimen hajoamista kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi sanotaan fissioksi. Fission voi aiheuttaa esimerkiksi ytimeen absorboituva neutroni tai fotoni.

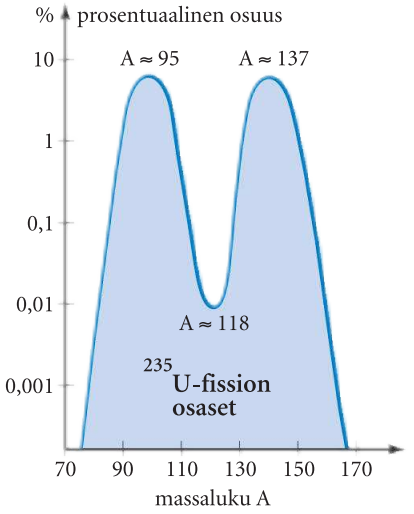
Luvussa 4.2 kuvattiin ydinten sidososuutta eli sidosenergian määrää nukleonia kohden.



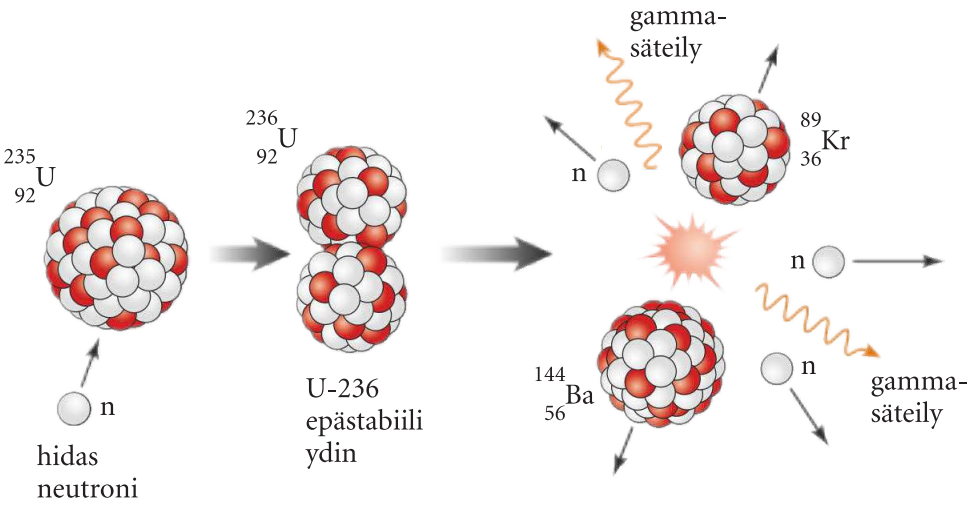
▲ **Sidososuus eli sidosenergia nukleonia kohden.**

Kuvan mukaan keskiraskailla ytimillä, joilla massaluku on 40 – 80, sidososuus on suurin. Tästä seuraa, että raskaiden ytimien kuten uraani-235:n fissiossa vapautuu energiaa. Fissiossa vapautuu energiaa noin 1 MeV/nukleoni. Tästä energiasta yli 90 % jää syntyvien hiukkasten liike-energiaksi ja loput esimerkiksi gammafotoni energiaksi.

Fissiossa syntyvät ytimet eivät yleensä ole samanmassaisia. Esimerkiksi uraani-235:n hajoamistuotteet noudattavat oheisessa kuvassa esitettyä jakaumaa.



▲ **Kuvassa on esitetty uraani-235:n fissiotuotteiden jakauma. Fissiotuotteet ovat todennäköisimmin massaluvultaan A = 95 ja A = 137. Hyvin vähän on niitä reaktioita, joiden tuotteissa on sama massaluku A = 118. Fissiotuotteet ovat radioaktiivisia ja hajoavat radioaktiivisensäteilyn kautta lopulta pysyviksi ytimiksi. Yksi mahdollisista hajoamisreaktioista on** $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$**. On huomattava, että pystyasteikko ei ole lineaarinen vaan logaritminen, koska kahden huipun kohdalla syntyvien ydinten määrä on niin paljon suurempi kuin muualla.**



▲ **Uraani-235:n fissio. Neutroni törmää U-235:n ytimeen, jolloin syntyvä epästabiili U-236-ydin halkeaa. Hajoaminen voi tapahtua usealla eri tavalla. Eräs mahdollisuus on, että syntyy ytimet Ba-144 ja Kr-89 sekä lisäksi neutroneja ja gammasäteilyä. Gammasäteilyä syntyy suoraan reaktiossa ja viiveellä virittyneeseen tilaan jääneiden tytärydinten viritystilojen purkautuessa. Koska raskaassa uraaniytimessä on suhteellisesti enemmän neutroneja kuin protoneja, syntyy kaksi hyvin epästabiilia runsasneutronista tytärydintä ja lisäksi vapaita neutroneja.**

Uraani–235:n fission tuottama energia

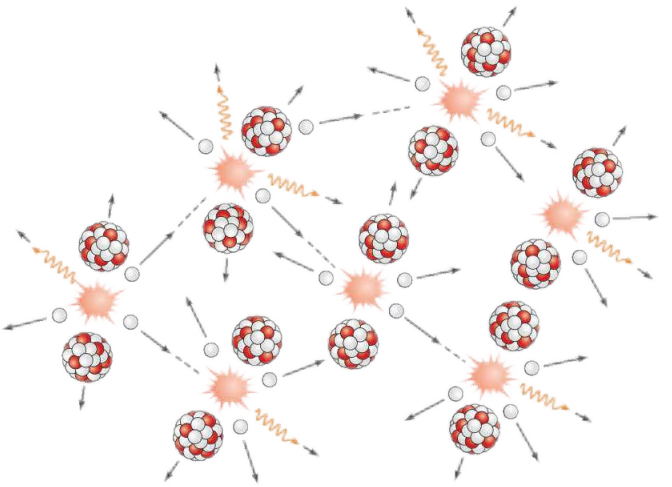
Energiamuoto	Energia (MeV)
Emoytimen hajoaminen	
Kahden tytärytimen liike-energia	165 ± 5
Gammasäteily	7 ± 1
Fission neutronien liike-energia	5 ± 0,5
Fission tytärydinten hajoaminen	
Gammasäteily	6 ± 1
Beetasäteily	7 ± 1
Neutriinot	10
Keskimääräinen vapautuva kokonaisenergia	**200 ± 6**

Ketjureaktio

Neutronien suhteellinen osuus ytimissä on sitä suurempi, mitä raskaampi ydin on. Kun raskas ydin hajoaa keskiraskaiksi ytimiksi, tytärytimiin ei ”mahdu” kaikkia neutroneja. Siksi fissiossa vapautuu aina neutroneja. Nämä vapautuvat neutronit voivat halkaista uusia ytimiä, jolloin syntyy **ketjureaktio**. Ketjureaktion edelly-

tyksenä on, että fissioituvan aineen massa on riittävän suuri, se ylittää niin kutsutun **kriittisen massan**. Silloin siinä on riittävä määrä ytimiä, jotta ketjureaktiossa vapautuvat neutronit vuorovaikuttavat muiden ytimien kanssa. Kriittisen massan suuruus riippuu muun muassa fissiossa hajoavan aineen pitoisuudesta ts. siitä, kuinka paljon siinä on hajoavia ytimiä.

Ketjureaktio saadaan aikaan alhaisellakin uraanin ^{235}U pitoisuudella, jos käytetään neutroneja hidastavaa ainetta. Tällöin hitaita neutroneja on riittävästi, ja niiden todennäköisyys vuorovaikuttaa uraaniytimen kanssa on suurempi kuin nopeilla neutroneilla.



▶ Fissioreaktio tapahtuu neutronin vuorovaikuttaessa uraaniytimen kanssa. Tällöin ydin halkeaa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi. Samalla vapautuu muutama uusi neutroni ja suuri määrä energiaa (noin 200 MeV). Ytimen halkeamisessa syntyvät neutronit voivat puolestaan aiheuttaa uusia fissioita, mikä mahdollistaa ketjureaktion syntymisen.

Esimerkki 2

Arvioi keskimääräinen vapautuva energia uraanin ^{235}U fissioreaktiossa.

Ratkaisu

Sidosenergiaosuuskuvan (s. 11) mukaan uraanin ^{235}U sidosenergia nukleonia kohden on noin 7,6 MeV, ja keskiraskaiden fissiotuotteiden ydinten sidosenergia nukleonia kohti on noin 8,5 MeV. Vapautuva energia on

$$Q = 235 \cdot (8{,}5 - 7{,}6)\ \text{MeV} \approx 200\ \text{MeV}.$$

Vastaus

Syntyvä energia on noin 200 MeV.

Ydinfuusio

Fuusiossa toistensa kanssa vuorovaikuttavat kevyet ytimet yhtyvät. Sidososuus kasvaa sidososuuskuvaajan osoittamalla tavalla, kun siirrytään kevyemmistä ytimistä keskiraskaisiin ytimiin kohti rautaa. Tästä seuraa, että kevyiden ydinten fuusioituessa energiaa vapautuu.

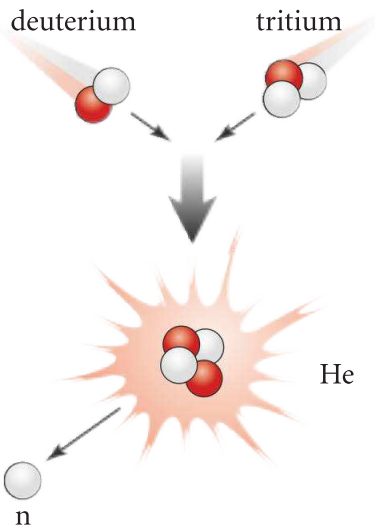
Fuusio vaatii sopivat olosuhteet, jotta ydinten välinen hylkimisvuorovaikutus voitetaan. Ytimiä tulee olla riittävästi, ja niillä tulee olla riittävän suuri nopeus. Tällainen tilanne saadaan aikaan esimerkiksi, kun aineen lämpötila on suuri, miljoonia asteita. Korkeassa lämpötilassa ydinten lämpöliike on riittävän nopeaa aikaansaamaan fuusion.

Auringon sisällä noin 10^8 K:n lämpötila on riittävän korkea pitämään yllä fuusiota. Auringon pääasiallisena energian tuottotapana on vety-ytimien fuusioituminen heliumiksi.

Fuusio voi tapahtua vedyn isotooppien deuteriumin ja tritiumin ytimien kesken, jolloin syntyy heliumydin ja neutroni. Ydinreaktiota esittää yhtälö

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Ydinreaktiossa vapautuu energiaa 17,6 MeV, josta neutronin liike-energia on noin 14,2 MeV.



▲ Heliumia syntyy deuteriumin ja tritiumin fuusiossa.

Kuvatun deuterium-tritium-reaktion avulla on mahdollista tuottaa energiaa fuusiovoimalaitoksissa. Deuteriumytimiä on runsaasti esimerkiksi merivedessä liittyneenä vesimolekyyleihin. Sen sijaan tritiumia on valmistettava keinotekoisesti esimerkiksi litiumytimistä. Tähdissä vallitsevat muut fuusioreaktiot.

Esimerkki 3

Laske vapautuva energia deuterium-tritium-reaktiossa

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Ratkaisu

Reaktioenergia on

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\mathrm{D}} + m_{\mathrm{T}} - m_{\mathrm{He}} - m_{\mathrm{n}})c^2 \\ &= (2{,}014102 + 3{,}016049 - 4{,}002603 - \\ &\quad 1{,}008665)\ \mathrm{u} \cdot 931{,}5\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}} \\ &\approx 17{,}5895\ \mathrm{MeV} \end{aligned}$$

Vastaus

Reaktioenergia on 17,6 MeV.

Esimerkki 4

Kuinka paljon vapautuu energiaa, kun gramma deuteriumia ja tritiumia fuusioituu?

Ratkaisu

Reaktioyhtälön

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

mukaan yksi deuteriumydin reagoi yhden tritiumytimen kanssa. Jos reaktioyhtälö luetaan ainemääriä kuvaavana, yksi mooli deuteriumytimiä ja yksi mooli tritiumytimiä fuusioituu keskenään. Mooli deuterium ytimiä on 2,0135532 g ja mooli tritium ytimiä on 3,0155007 g, yhteensä siis 5,0290539 g. Moolissa on Avogadron luvun $N_{\mathrm{A}} = 6{,}0221367 \cdot 10^{23}$ ilmoittama määrä hiukkasia. Esimerkin 3 mukaan yhden deuterium- ja tritiumytimen reaktiossa vapautuu energiaa 17,5895 MeV. Siten 5,0290539 g:sta reaktion lähtöaineita vapautuu energiaa

$$\begin{aligned} &6{,}0221367 \cdot 10^{23} \cdot 17{,}5895\ \mathrm{MeV} \\ &= 1{,}059264 \cdot 10^{31}\ \mathrm{eV}. \end{aligned}$$

Yhdestä grammasta lähtöaineita vapautuu siis

$$\begin{aligned} &\frac{1{,}059264 \cdot 10^{31}\,\mathrm{eV}}{5{,}0290539} \\ &= 2{,}106289 \cdot 10^{30}\ \mathrm{eV} \\ &= 2{,}106289 \cdot 10^{30} \cdot 0{,}16021773 \cdot 10^{-18}\ \mathrm{J} \\ &= 0{,}33746 \cdot 10^{12}\ \mathrm{J} \approx 0{,}34 \cdot 10^{12}\ \mathrm{J}. \end{aligned}$$

Vastaus

Grammasta deuteriumia ja tritiumia vapautuu energiaa 0,34 TJ.

Huom.

Jyväskylän kaupungissa kuluu energiaa vuodessa noin $2{,}6\ \mathrm{TWh} \approx 2{,}6 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J}$. Tähän tarvittaisiin $\frac{2{,}6 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J}}{0{,}34 \cdot 10^{12}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{g}}} \approx 76\,000\ \mathrm{g} = 76\ \mathrm{kg}$ fuusioituvaa ainetta.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

6.2 Fissioydinvoimalat

Fissiovoimalan pääperiaate

Lämpövoimalaitokset, joita on kuvattu Physica 2 –kirjassa, tuottavat energiaa termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti kiertoprosessin kautta. Kiertoprosessin vaatima lämpö saadaan esimerkiksi polttamalla öljyä, ja kiertoprosessista saatava energia voidaan muuttaa generaattorin avulla sähköenergiaksi.

Fissioydinvoimala tuottaa energiaa lämpöopin periaatteiden kannalta samalla tavalla kuin muutkin lämpövoimalaitokset. Toimintaan tarvittava lämpö saadaan kontrolloidun ketjureaktion kautta. Ketjureaktiossa halkeavista ytimistä sinkoutuvat neutronit synnyttävät uusia halkeamisia. Jotta reaktio ei pysähtyisi tai voimistuisi liikaa, ketjureaktiota on kontrolloitava. Kontrolloidun ketjureaktion halkeamisreaktioissa vapautuvat fissiotuotteet törmäävät ympäröivän väliaineen rakenneosasiin, jolloin fissiotuotteiden liike-energia pienenee ja energian säilymisperiaatteen mukaan väliaineen sisäenergia kasvaa. Väliaineen sisäenergiasta osa voidaan muuttaa generaattorin pyörimisenergiaksi ja edelleen sähköenergiaksi, kuten muissakin lämpövoimaloissa (ks Physica 2, s. 159).

Erilaiset reaktorityypit

Fissioreaktorityypit voidaan luokitella muun muassa sillä perusteella, mitä ainetta niissä käytetään neutronien hidastimena ja syntyvän lämpöenergian kuljettimena.

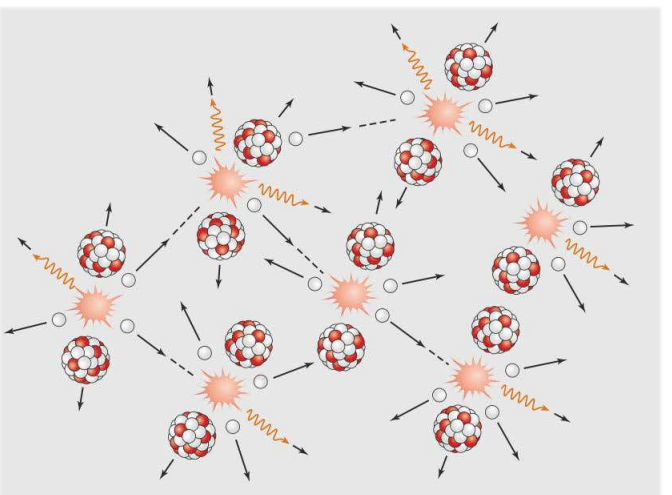
Yleisimmät fissioreaktorityypit ovat seuraavat:
- kevytvesireaktorit,
- raskasvesireaktorit ja
- kaasujäähdytteiset grafiittihidasteiset reaktorit.

Suomessa Loviisan ja Olkiluodon voimalaitokset ovat kevytvesireaktoreita.
Kevytvesireaktoreita on kahta tyyppiä:
- painevesireaktori (PWR, *pressurized water reactor*) ja
- kiehutusvesireaktori (BWR, *boiling water reactor*).

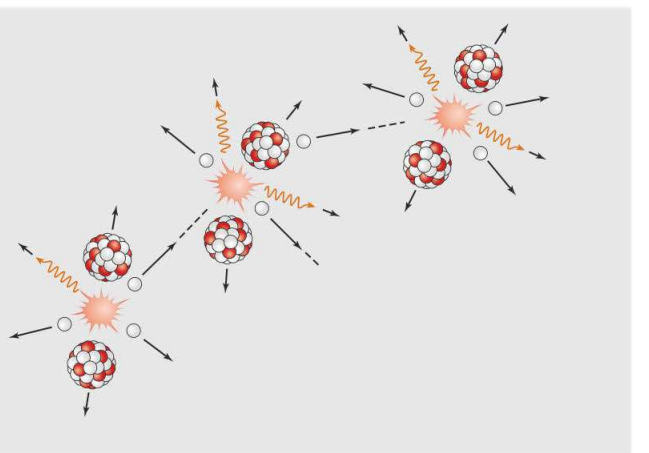
Olkiluotoon rakennettava uusi ydinvoimalaitos on painevesityyppinen. Laitosyksikön sähköteho on noin 1 600 MW.

Isotoopin U-238 pitoisuus luonnonuraanissa on yli 99 % ja radioaktiivisen isotoopin U-235 noin 0,7 %. Käytettäessä uraania kevytvesireaktoreissa luonnonuraanin U-235-pitoisuus ei

a)



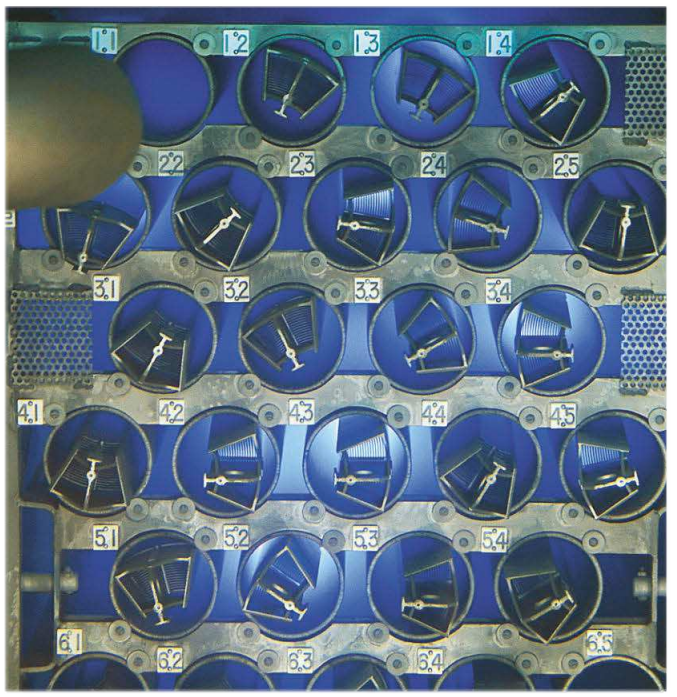
b)



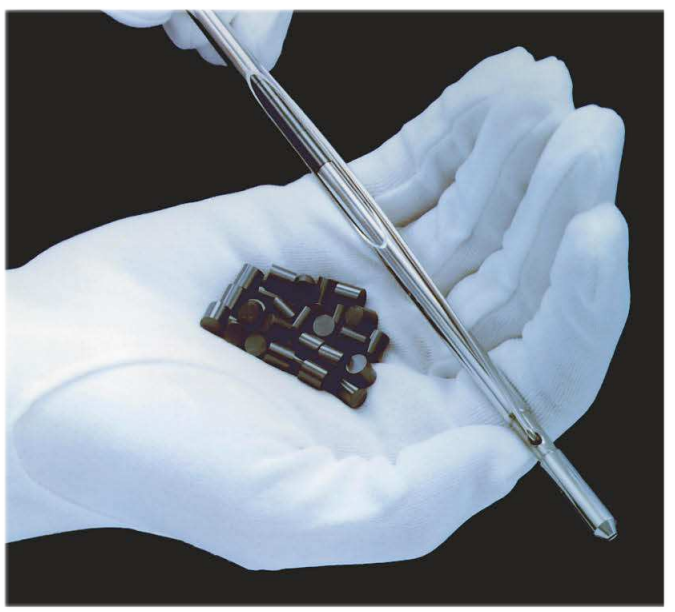
▲ **a) Ketjureaktiossa syntyy kutakin halkeamista kohden keskimäärin 2–3 neutronia.**
b) Kontrolloidussa reaktiossa osa neutroneista absorboituu säätösauvoihin, joiden atomiytimet eivät fissioidu neutronien vaikutuksesta. Näin reaktio ei kiihdy liikaa, mutta pysyy silti käynnissä.

ole riittävä ylläpitämään jatkuvaa ketjureaktiota. Jotta jatkuva ketjureaktio saadaan, U-235-pitoisuutta kasvatetaan keinotekoisesti noin 3–5 %:iin.

Vaikka ydinreaktiossa ytimet eivät kemiallisessa mielessä pala, käytettävää fissioainetta kutsutaan usein polttoaineeksi. Fissioreaktoreissa uraani-235 on uraanidioksiditabletteina **polttoainesauvoissa**. Nämä sauvat on koottu 60–100 sauvan nippuihin polttoaine-elementeiksi, jotka asetetaan reaktoriin. Yhteensä sauvoja on muutamia kymmeniä tuhansia. Nippuja pidetään reaktorissa 3–5 vuotta, jonka jälkeen ne vaihdetaan uusiin. Reaktorissa on eri-ikäisiä sauvoja, sillä siten niitä ei tarvitse vaihtaa kaikkia samalla kertaa.

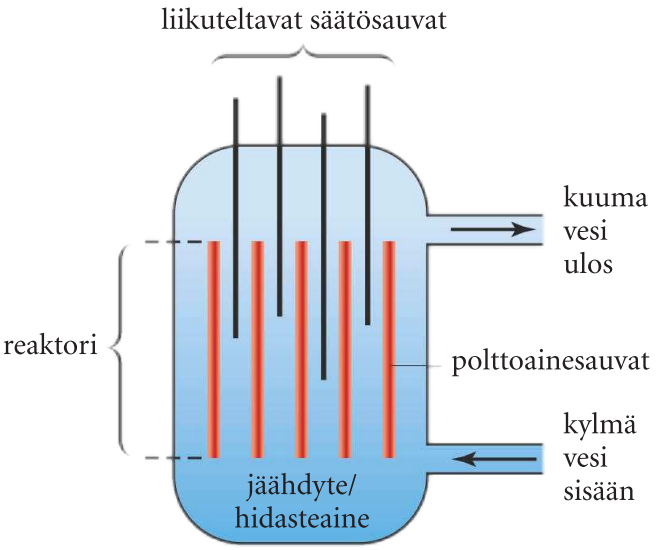


▲ **Polttoainesauvat reaktorissa**

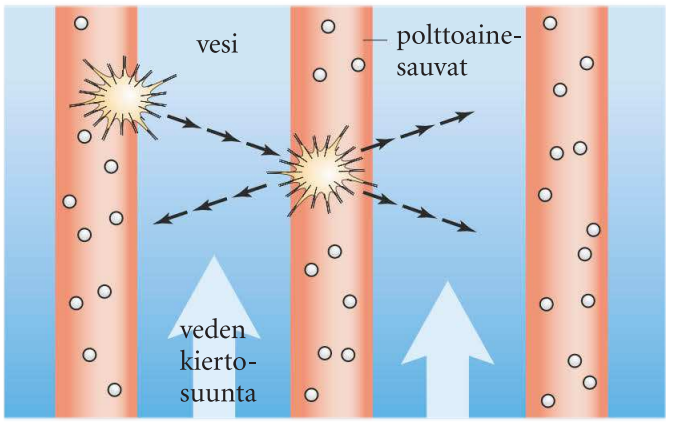


Polttoaine-elementtien välissä on **hidastinainetta**, joka hidastaa fissioreaktiossa syntyvät nopeat neutronit riittävän hitaiksi. Hitaat neutronit reagoivat uraaniydinten kanssa todennäköisemmin kuin nopeat.

Polttoaine-elementtien välissä on vielä lämpöenergiaa kuljettavaa **jäähdytettä**. Kevyt- ja raskasvesireaktoreissa vesi toimii sekä hidastimena että jäähdytteenä.



▲ **Reaktorin säätösauvat, polttoainesauvat ja jäähdyte.**

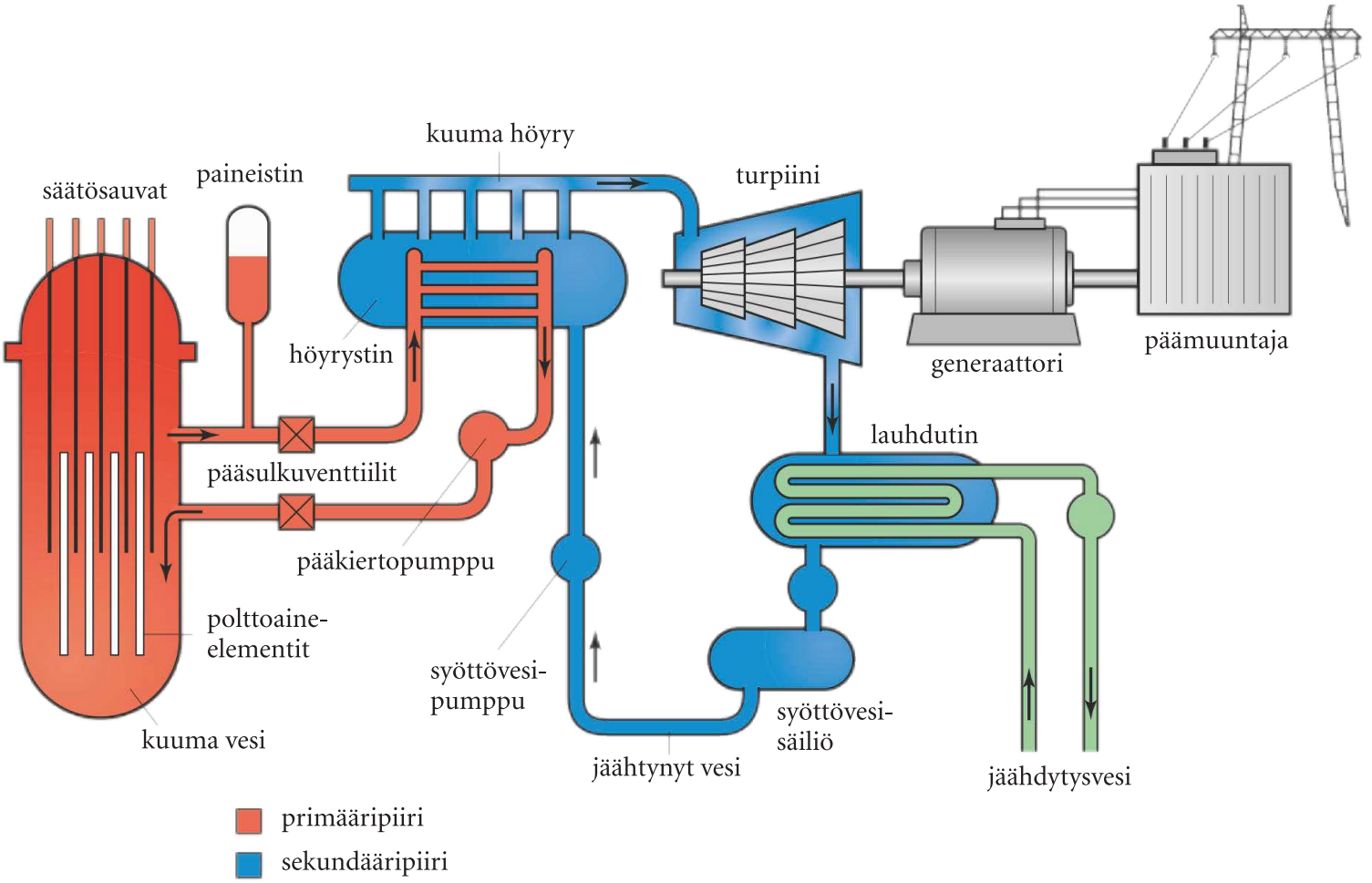


▲ **Uraanin fissiossa syntyvät neutronit ovat liian nopeita aiheuttamaan fission. Siksi neutronit tulee hidastaa. Suomen ydinvoimaloissa hidastimena käytetään polttoainesauvojen välissä olevaa vettä, joka toimii myös jäähdytteenä. Jäähdytteeseen sitoutuvaa lämpöenergiaa käytetään tuottamaan sähköenergiaa vastaavalla tavalla hiili- tai turvevoimaloissa.**

◀ **Polttoainetabletteja**

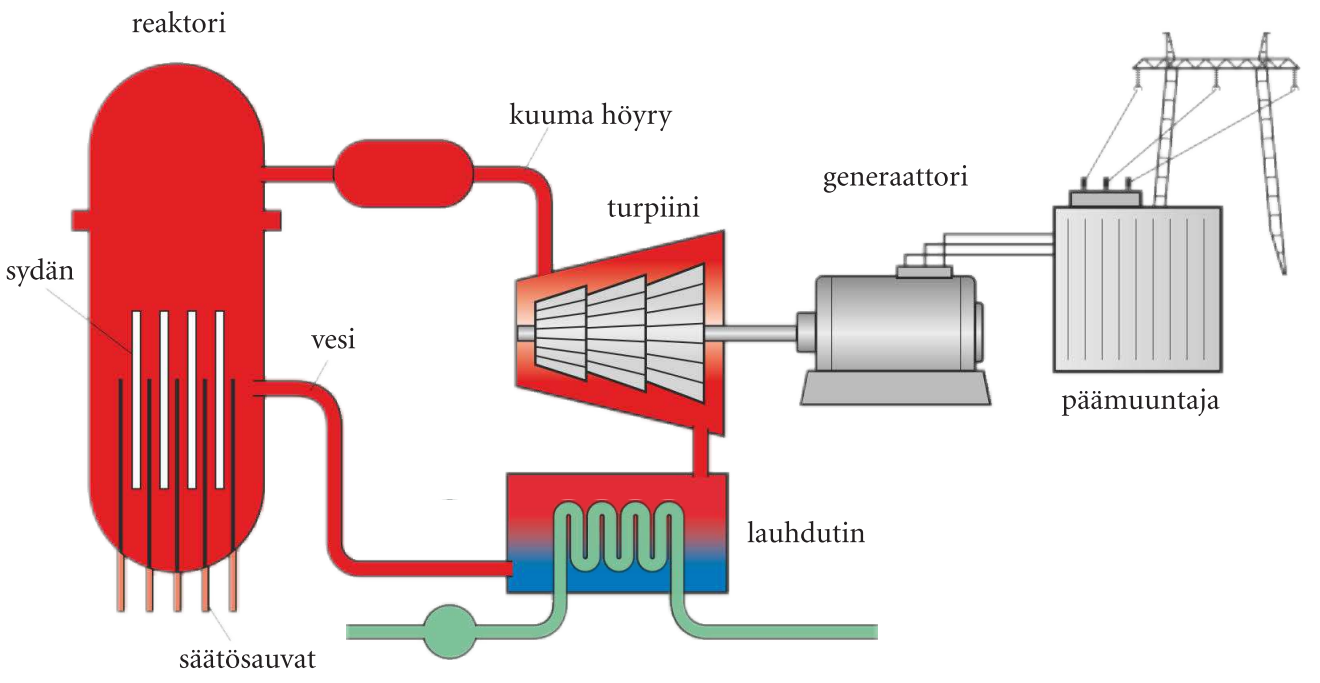
Reaktorin tehoa voidaan säädellä jäähdytteen virtausnopeutta muuttamalla ja **säätösauvojen** avulla. Säätösauvat sisältävät aineita, jotka absorboivat fissiossa syntyviä neutroneja tehokkaasti. Tällaista ainetta on muun muassa boori. Säätösauvoja liikutellaan polttoaine-elementtien välissä. Kun säätösauvat nostetaan ulos reaktorista, neutronien pitoisuus kasvaa, jolloin fissio kiihtyy. Säätösauvoilla voidaan tehdä myös reaktorin pikasulku. Tällöinkään fissio ei lakkaa, vaan neutronien poiskeräämisellä ainoastaan hidastetaan fissioiden tapahtumista.

Painevesilaitoksen toimintakaavio



Painevesireaktorin reaktorisydämessä on noin 150 barin paine, jolloin 300-asteinen vesi ei höyrysty. Vesi pumpataan nesteenä höyrystimeen, jossa se luovuttaa lämpöenergiaa sekundaaripiirissä kiertävälle vedelle. Höyrystimessä syntyvä höyry johdetaan noin 55 barin paineessa ja 270 asteen lämpötilassa turpiineille. Höyry luovuttaa osan energiastaan turpiineille ja jäännöslämpö poistetaan lauhduttimessa, jossa höyry tiivistyy vedeksi. Reaktorisydämen läpi kulkeva vesi ja turpiinille menevä höyry muodostavat omat suljetut piirinsä. Kolmannen erillisen piirin muodostaa jäähdytysvesi.

Kiehutusvesivoimalaitoksen toimintakaavio



Kiehutusvesireaktorin reaktorisydän on suljettu paineastiaan. Polttoainesauvoista lämpö siirtyy sydämen läpi virtaavaan jäähdytysveteen, joka kuumenee ja höyrystyy osittain. Paineastian yläosassa höyry johdetaan höyryturbiinille. Höyryn paine on noin 70 bar ja lämpötila 290 astetta. Turpiinissa laajeneva höyry pyörittää turpiinia ja siihen kytkettyä sähkögeneraattoria. Turpiinissa jäähtynyt höyry tiivistyy lauhduttimessa vedeksi, joka pumpataan takaisin reaktoripaineastiaan. Höyry on lievästi radioaktiivista, minkä vuoksi turpiinihallissa ei voi oleskella laitoksen toiminnan aikana.

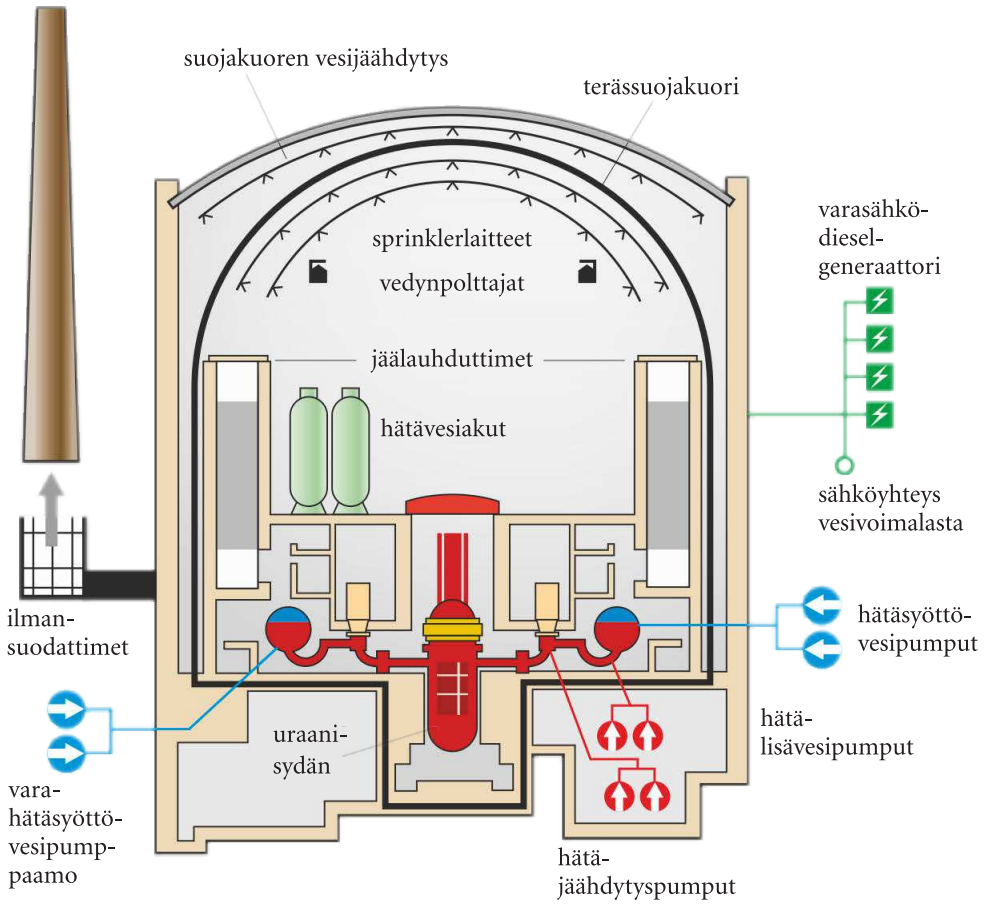
Ydinvoimalaitoksen turvajärjestelyt

Radioaktiivisten päästöjen ehkäisemiseksi ja ydinvoimalaonnettomuuksien estämiseksi ydinvoimaloissa on monipuoliset turvallisuusjärjestelmät. Voimala voidaan pysäyttää nopeasti laskemalla säätösauvat reaktoriin. Koska boori absorboi voimakkaasti neutroneja, reaktori voidaan sammuttaa myös ruiskuttamalla booria primaarikiertoon. Sammuneen reaktorin jälkilämpö voidaan poistaa hätäjäähdytysjärjestelmällä. Myös jäälauhduttimet estävät paineen nousua onnettomuudessa, ja lisäksi suojarakenteilla estetään mahdollisten radioaktiivisten vuotojen pääsy ympäristöön. Koska onnettomuudessa sähköjärjestelmät saattavat vioittua, ydinvoimalassa on varasähköjärjestelmät, jotta turvalaitteet toimivat myös onnettomuustilanteessa.

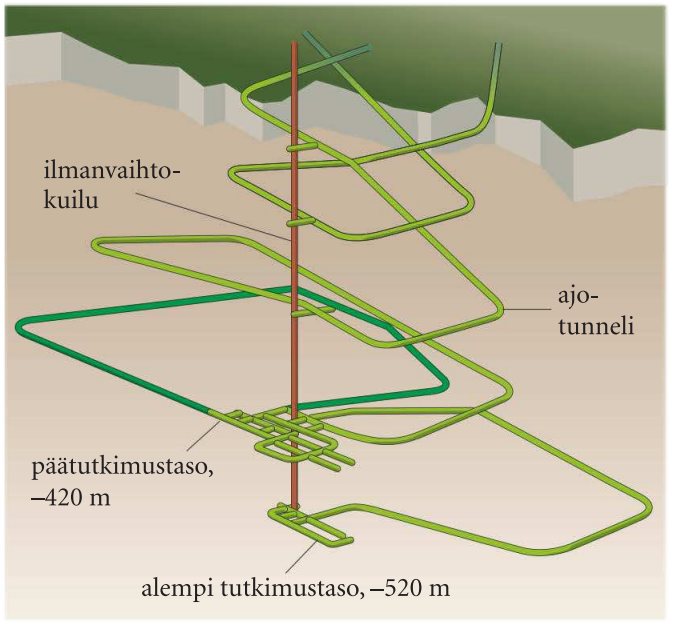
Käytetty polttoaine sijoitetaan **välivarastoihin**, joista se useiden vuosien jälkeen siirretään jälleenkäsiteltäväksi. Jälleenkäsittelylaitoksessa käytetystä polttoaineesta erotetaan fissioituvat aineet, uraani ja plutonium. Suomessa ydinvoimaloiden polttoainejätteet säilytetään toistaiseksi Loviisan ja Olkiluodon välivarastoissa.

Vuoden 1994 ydinenergialain mukaan kaikki Suomessa syntyvä ydinjäte on **loppusijoitettava** Suomeen. Käytetyt polttoaineniput on tarkoitus kapseloida ja loppusijoittaa kallioperään Eurajoelle noin puolen kilometrin syvyyteen rakennettaviin tiloihin. Loppusijoituksen on tarkoitus alkaa noin vuonna 2020.

Ydinvoimalaitosten rakentamiseen, raaka-aineen hankintaan, käyttöön ja ydinjätteen loppusijoitukseen liittyy monia käytännöllisiä ja eettisiä ongelmia. Koko ihmiskuntaa ajatellen ydinvoiman aiheuttamat ongelmat saattavat kuitenkin olla huomattavasti pienemmät kuin kasvihuoneilmiön maailmanlaajuiset ympäristöongelmat, jotka seuraavat fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja muista kasvihuoneilmiötä vahvistavista tekijöistä.



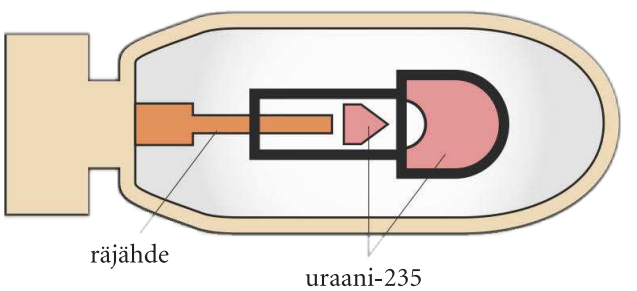
▲ **Loviisan ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmä**



▲ **Loppusijoitustunneli.**

Ydinaseet

Kun luonnontieteilijät olivat keksineet ydinreaktiot ja niistä vapautuvat energiat, ei kestänyt kauan, kun niistä kehitettiin aseita. Aseiden kehittämiseen vaikutti ratkaisevasti vallitseva maailmanpoliittinen tilanne. Ydinaseissa käytetään räjähdysaineena joko fissioituvaa tai fuusioituvaa materiaalia. Fissioon perustuvia pommeja kutsutaan atomipommeiksi ja fuusioon perustuvia vetypommeiksi.



▲ **Atomipommissa on kaksi kriittistä massaa pienempää uraanikappaletta, jotka laukaisuhetkellä saatetaan yhteen. Tällöin saavutetaan kriittinen ydinmassa ja ketjureaktio alkaa. Pommi räjähtää.**

Vetypommi perustuu fuusioreaktioon. Jotta pommissa oleva fuusiokykyinen aine voi fuusioitua, tarvitaan riittävän korkea lämpötila. Tällainen tila saadaan aikaiseksi räjäyttämällä ensin pieni fissiopommi. Fission seurauksena lämpötila ja paine nousevat, jolloin fuusioreaktio käynnistyy. Fuusioituvat aineet saadaan litiumhydridistä LiD. Fission neutronit synnyttävät litiumista tritiumia, joka fuusioituu deuteriumin kanssa. Fuusiosta vapautuva energia aiheuttaa pommin räjähdyksen.

Kun luonnontieteilijät havahtuivat ydinaseiden karmeaan tuhoon, he perustivat 1950-luvulla Pugwash-liikkeen. Pugwashin perustajina olivat mm. Albert Einstein ja Bertrand Russell. Liike toimii yhä pyrkien joukkotuhoaseiden käytön rajoituksiin.

▲ **Yhdysvallat teki ydinasekokeita muun muassa Bikini-atolleilla Tyynellä valtamerellä. Kokeet synnyttivät suureen hälyn mediassa, sillä niiden aiheuttama radioaktiivinen saaste vahingoitti sekä ihmisiä että luontoa. Bikini-uima-asu on saanut nimensä juuri Bikini-saarilla tehdyistä kokeista.**

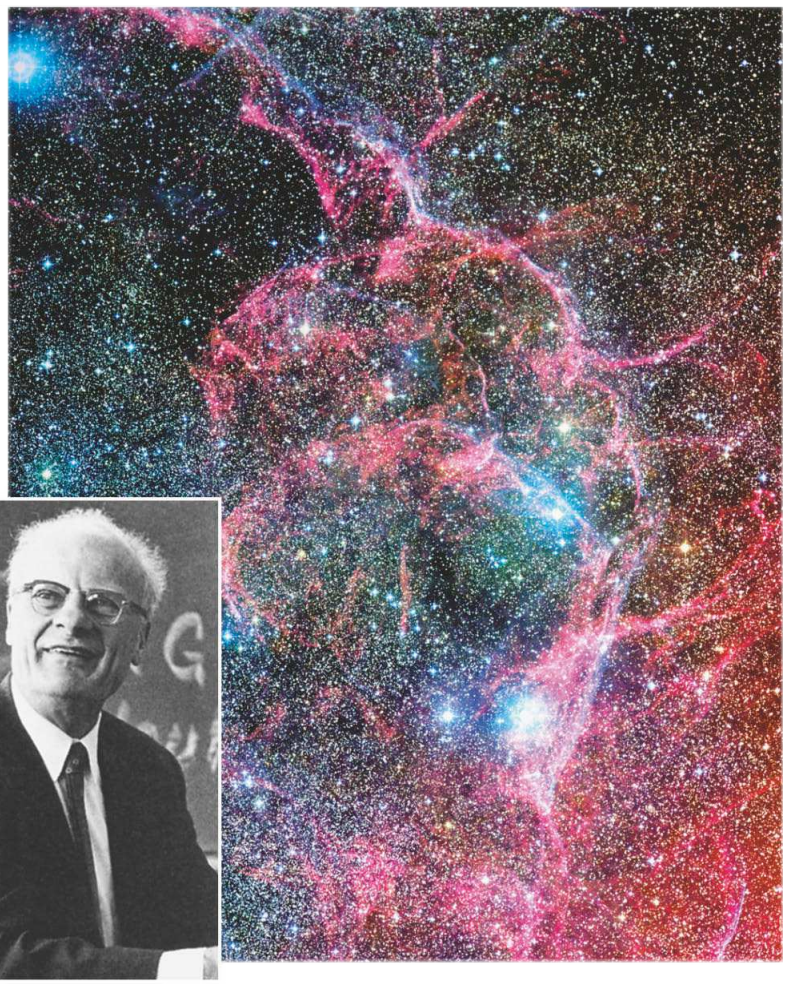
Tehtäviä ➢ 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

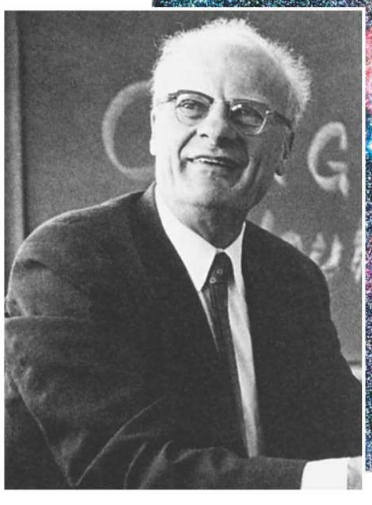
6.3 Fuusio tähdissä ja ydinvoimaloissa

Fuusio tähdissä

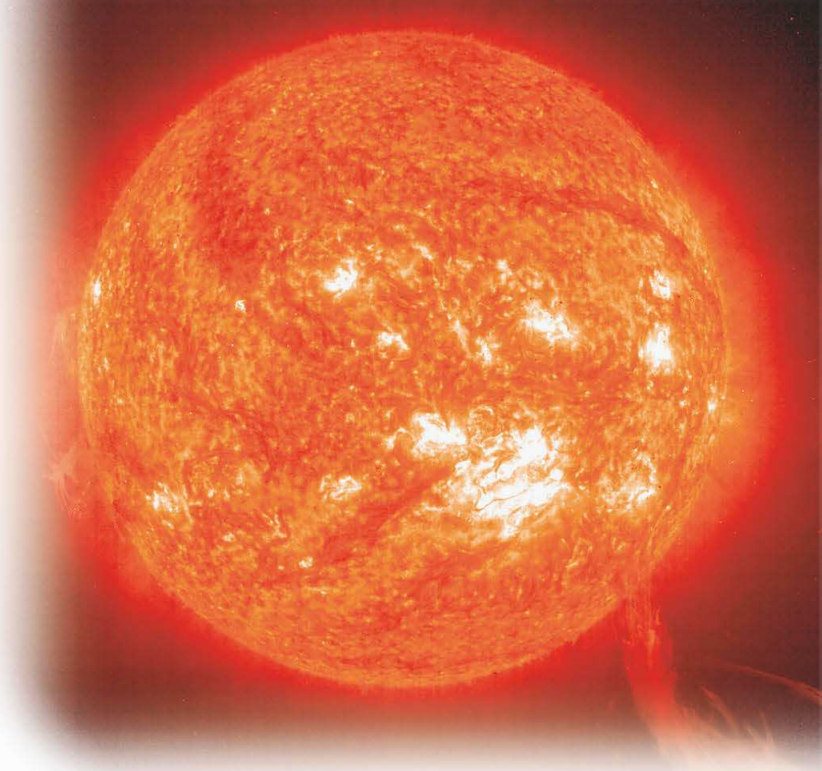
Maapallolla esiintyy lähes sata erilaista alkuainetta, jotka kaikki ovat peräisin tähtien tuhoutuessaan avaruuteen sirottelemasta aineesta. Tähdet toimivat alkuaineiden tuottajina ja niiden avaruuteen jakajina.

Energian tuottamisen ohella fuusiolla on tärkeä merkitys vetyä raskaampien alkuaineiden tuottajana. Rautaa kevyemmät alkuaineet syntyvät fuusiossa Auringon kaltaisissa tähdissä. Helium syntyy vety-ydinten fuusiossa ja heliumin fuusioreaktiot synnyttävät edelleen raskaampia alkuaineita.





▲ **Saksalainen Hans Bethe (1906–2005) muutti 1933 Saksasta Englannin kautta Yhdysvaltoihin. Bethe voitti fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1967. Toisen maailmansodan aikana hän johti Los Alamosissa sijainneen atomipommiprojektin teoreettista osastoa, joka selvitti muun muassa pommin vaatiman uraani-235:n kriittisen massan. Myöhemmin Bethe kampanjoi Albert Einsteinin kanssa ydinkokeita ja kilpavarustelua vastaan.**



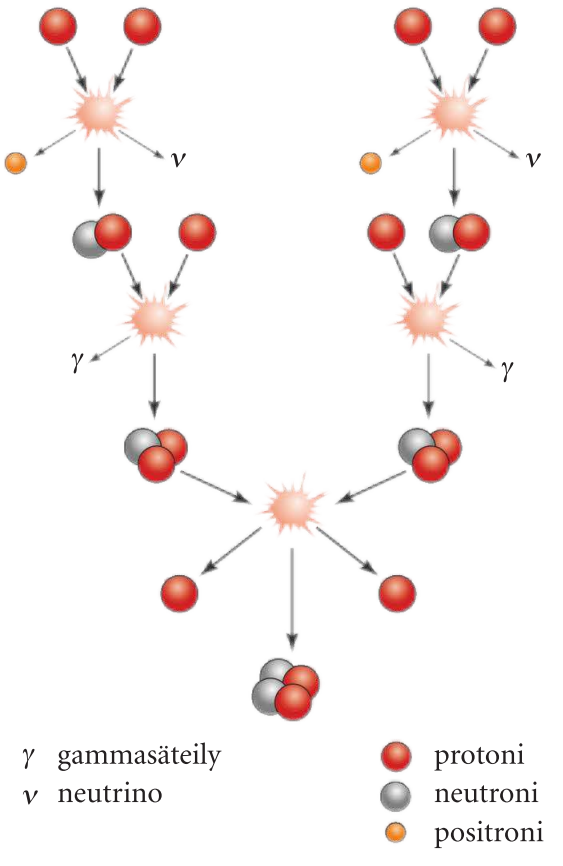
▲ **Aurinko tuottaa energiansa fuusioimalla vetyä heliumiksi.**

Vedyn muuttuminen Auringossa heliumiksi voi tapahtua useita reittejä, joista tärkein on niin sanottu protoni–protoniketju:

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H}_{0} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}_{0} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H}_{1} + \mathrm{e}^{+} + \nu $$

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H}_{0} + {}^{2}_{1}\mathrm{H}_{1} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}_{1} $$

$$ {}^{3}_{2}\mathrm{He}_{1} + {}^{3}_{2}\mathrm{He}_{1} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}_{2} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}_{0} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}_{0} $$



▲ **Protoni–protoniketjussa syntyy heliumia.**

▲ **Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–) keksi yhdessä Hans Bethen kanssa 1937 ns. Bethe-Weizsäcker–lausekkeen, joka kuvaa ydinten muodostumista tähdissä. Tätä ennen luonnontieteilijät olivat yrittäneet selittää Auringon ja muiden tähtien energiantuottoa esimerkiksi hiilen palamisella.**

Auringossa vetyä riittää noin kymmeneksi miljardiksi vuodeksi, vaikka Auringossa fuusioituu 600 miljoonaa tonnia vetyä sekunnissa 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Massasta neljä miljoonaa tonnia sekunnissa muuttuu energiaksi, joten yhtälön $E = mc^2$ mukaan Auringon kokonaisteho on noin $3{,}9 \cdot 10^{26}$ W.

Keskiraskaiden alkuaineiden synty

Heliumia raskaammat alkuaineet aina rautaan saakka syntyvät erilaisten fuusioreaktioiden kautta tähdissä.

Lämpötila tähtien ytimessä kasvaa tähden kehityksen myötä. (Tähtien kehitystä on kuvattu lyhyesti kirjassa Physica 1.) Jotta tähti kävisi läpi kaikki fuusioprosessit, tähden massan on oltava yli 15 kertaa Auringon massa. Kevyemmissä tähdissä lämpötila ei nouse riittävän korkeaksi, jotta piin (Si) fuusio onnistuisi.

Lämpötila tähden keskellä (MK)	Prosessi	Fuusiotuote
10–20	vedyn fuusio	helium
100–200	heliumin fuusio	hiili, happi
500	hiilen fuusio	neon, natrium, magnesium
1000	hapen fuusio	pii, rikki, fosfori
2000–4000	piin fuusio	rauta, nikkeli

Koska rautaa raskaampien alkuaineiden fuusio ei voi tapahtua spontaanisti, niiden syntyyn tarvitaan ulkopuolista energiaa. Riittävän korkeassa lämpötilassa neutroneilla on riittävästi liike-energiaa, jotta ne voivat yhtyä ytimiin.

Raskaiden alkuaineiden synty

Rautaa raskaammat alkuaineet syntyvätkin supernovissa, joissa on riittävän korkea lämpötilat raskaampien ytimien muodostumiseen.

Fuusio tulevaisuuden energianlähteenä

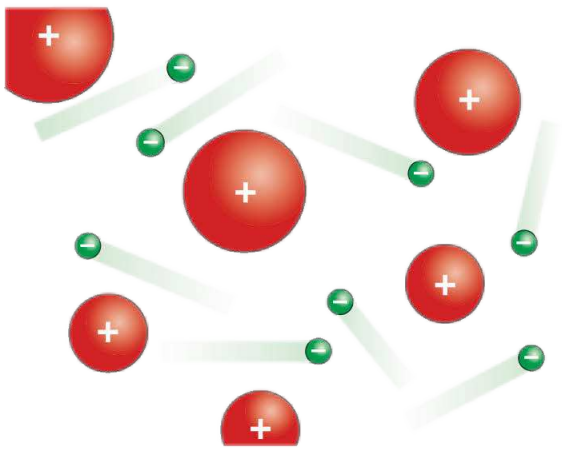
Fissioon perustuvia ydinvoimaloita on ollut kaupallisessa käytössä yli 50 vuotta. Koska niiden käyttöön liittyy turvallisuusriskejä ja uraanivarat maapallolla ovat rajalliset, fuusiovoimalaitoksia yritetään kehittää. Fuusiovoimalaitoksen rakentamisen suurimpana teknisenä ongelmana on ollut, ja on edelleen, fuusion vaatima korkea lämpötila. Tutkijat eivät ole ratkaisseet perusongelmaa: miten miljoonien asteiden fuusioaine saadaan pysymään hallitusti reaktorissa. Nykyään ei vielä ole olemassa fuusiovoimalaa, jonka avulla voisi tuottaa sähköä kaupallisesti.

Fissioon verrattuna fuusiolla on huomattavia toiminnallisia, ympäristöön ja turvallisuuteen liittyviä etuja.

- Fuusiossa käytettäviä aineita (deuteriumia ja litiumia) on paljon joka puolella maapalloa.
- Fuusioreaktiossa syntyvä helium ei ole radioaktiivista.
- Fuusioreaktion radioaktiivista tritiumia tuotetaan litiumista reaktorin vaipassa. Radioaktiivista materiaalia ei siis tarvitse kuljettaa voimalaan.

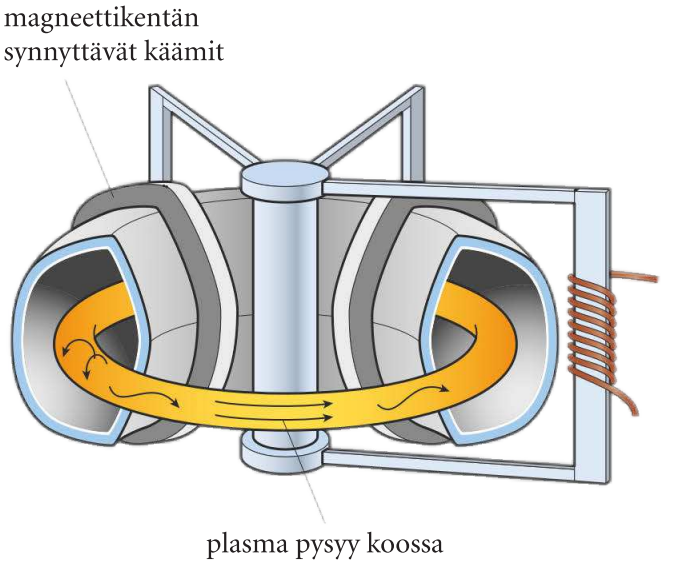
- Fuusiovoimalassa syntyvät jätteet eivät kuormita tulevia sukupolvia pitkään. Tritiumin puoliintumisaika on lyhyt, 12,3 vuotta.
- Ydinvoimalaitoksena fuusiovoimala ei aiheuta kasvihuonekaasupäästöjä.

Fuusion deuterium-tritium-reaktio vaatii noin 100 miljoonan kelvinin lämpötilan. Tässä lämpötilassa aine on täysin ionisoitunutta plasmaa, jossa elektronit kulkevat vapaasti ydinten joukossa. Auringossa plasma pysyy koossa gravitaation avulla. Näin ei voi olla ydinvoimalassa, jossa plasmaa ei ole suuria määriä. Koska plasman hiukkasilla, ytimillä ja elektroneilla, on sähkövaraus, plasmaa voidaan ohjailla magneettikenttien avulla.



▲ **Plasma koostuu positiivisista ytimistä ja vapaista elektroneista.**

Fuusioreaktoreissa plasma pidetäänkin koossa magneettikentän avulla. Niin sanotuissa tokamak-laitteissa plasma muodostaa suljetun renkaan. Tokamak-sana on peräisin venäjän kielestä ja kuvaa sylinterimäistä magneettikammiota.



▲ **Tokamak-laitteesssa plasma pidetään koossa magneettikenttien avulla.**

Fuusioreaktorin kehittämistä varten on perustettu kansainvälinen tutkimus- ja kehityshanke ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor)* Latinankielinen sana *iter* tarkoittaa ’keinoa’, joten nimi viittaa siihen, miten ITER:n avulla saadaan valjastettua ydinfuusio ydinenergian lähteeksi. ITER:n avulla on tarkoitus ottaa seuraava merkittävä askel fuusioenergian kehittämisessä. ITER-laitetta on kehitetty viimeisen kymmenen vuoden aikana.

ITERin rakennustyöt alkavat Ranskassa ehkä vuonna 2008. Suunnitelmien mukaan laitteisto olisi toimintakunnossa 2016. ITER:n kehittämiseen osallistuvat myös monet suomalaiset yliopistot ja yritykset.

ITER-laitteen tokamak, plasmaa koossapitävä magneettikenttä, on 24 metriä korkea ja 30 metriä leveä. Toiminnassa laite tuottaa enintään 500 megawattin teholla lämpöä renkaan muotoisessa 800 m^3:n fuusioplasmassa.

Tehtäviä ➢ 16, 17, 18, 19, 20

Jättimäinen fuusiovoimala Iter valmistuu Etelä-Ranskaan 2016

►Iter-fuusiovoimala yrittää valmistaa energiaa Maan päällä niin kuin sitä syntyy Auringossa. Tarvittavat aineet fuusioon saa merivedestä ja alkuaine litiumista. Fuusion raaka-aineita litiumia ja deuteriumia riittää miljooniksi vuosiksi.

►Iter on vasta koevoimala. Jos se onnistuu, maailmaan voi kohota 2040-luvulta lähtien satoja kaupallisia fuusiovoimaloita.

Suojakuori on heikosti radioaktiivinen satakunta vuotta.

Reaktori on 24 metriä korkea ja 30 metriä leveä.

Plasma on kuumaa kaasua, jossa on sähkövaraus. Hyvin vahvat magneetit pitävät plasmaa koossa. Ne eristävät plasman seinästä, eikä plasma jäähdy.
Plasma virtaa hyvin liukkaasti, ja se yritetään pitää magneetein kasassa. Näin voimala tuottaisi energiaa vakaasti, ei ryöppyinä.
Magneettien seinämien ulkopuolella on tyhjiökammio.

Fuusiossa syntyvä lämpö siirtyy metallivaipan kautta jäähdytteeseen. Se voi olla esimerkiksi vettä. Kuuma vesihöyry pyörittää turbiinia. Turbiiniin kytketty generaattori muuntaa pyörimisliikeen sähköenergiaksi.

Plasmaa

Ihminen samassa mittakaavassa

Eurooppalainen veronmaksaja maksaa noin euron vuodessa fuusiotutkimuksesta.

Lähteet: New Scientist 12. marraskuuta 2005; Cd-rom: Fusion an energy option for the future; www.iter.org

HELSINGIN SANOMA

Teksti: TIMO PAUKKU / HS; Grafiikka: LOTTA HAGLUND

Iter: International Thermonuclear Experimental Reactor

Cadarache

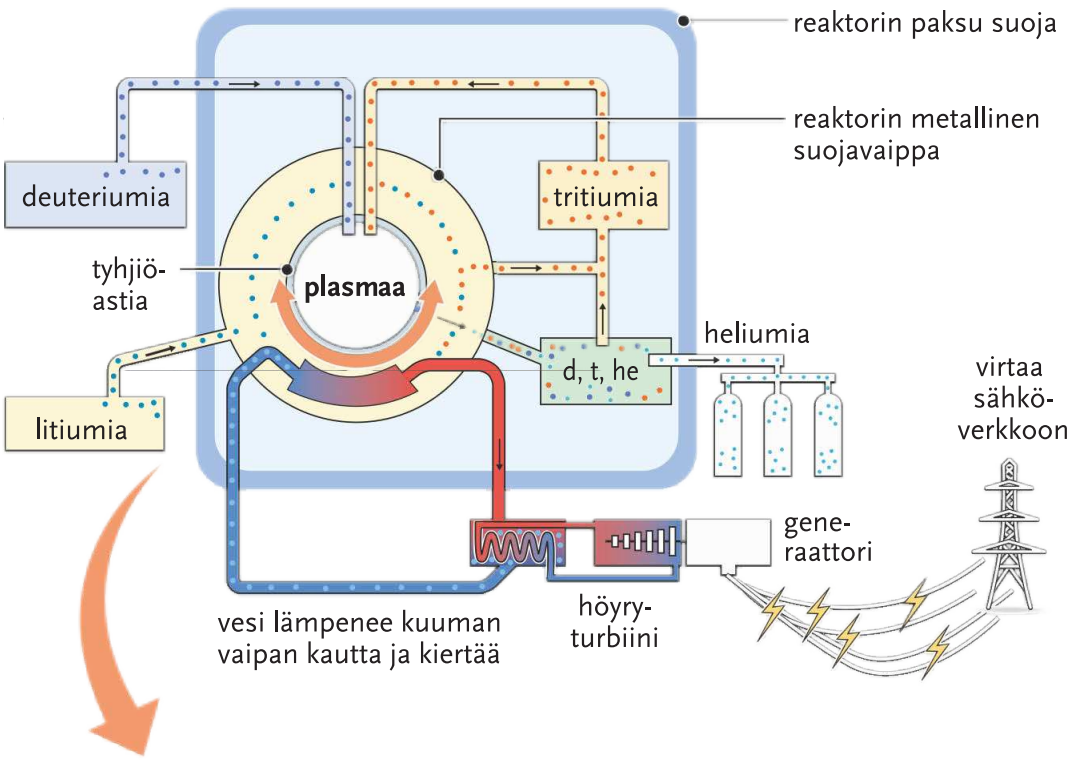
Iterin teho on 500 megawattia eli noin yksi ydinvoimalan yksikkö. Reaktori on ns. tokamak. Ensimmäiset tokamakit rakennettiin 1950-luvulla.

Reaktorin sydämessä plasma kuumenee sataan miljoonaan asteeseen. Plasmaa on 850 kuutiometriä. Kuumennus onnistuu radioaaltojen ja hiukkassuihkujen avulla. Plasma sisältää deuteriumin ja tritiumin ytimiä.

Koevoimala ylhäältä päin

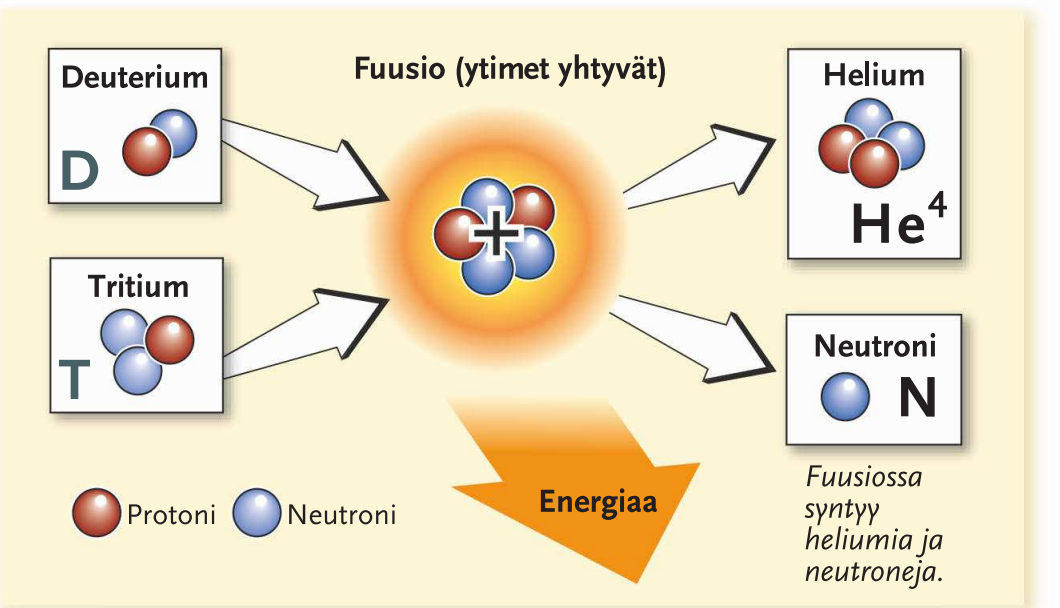
►Deuterium ja tritiunumin raaka-aine, litium, johdetaan samaan tilaan ja kuumennetaan plasmaksi. Jos fuusio pysyy yllä, se lämmittää jatkuvasti fuusioreaktoria ja vaippaa. Kuuma vaippa lämmittää puolestaan vettä, joka tuottaa energiaa höyryturbiinien ja generaattorien avulla sähköverkkoon.

►Litrassa vettä on 33 milligrammaa deuteriumia. Fuusiossa se vastaa 343 bensalitran energiaa.



Vedyn isotoopit yhtyvät

►Fuusiossa alkuaine vedyn kaksi kevyttä isotooppia yhdistyvät isommaksi. Deuterium kuumenee noin sataan miljoonaan asteeseen celsiusta. Tällöin sen atomien ytimet yhtyvät tritiumiin. Samalla syntyy paljon energiaa.



Energia on atomien sisäisten voimien vapauttamista.

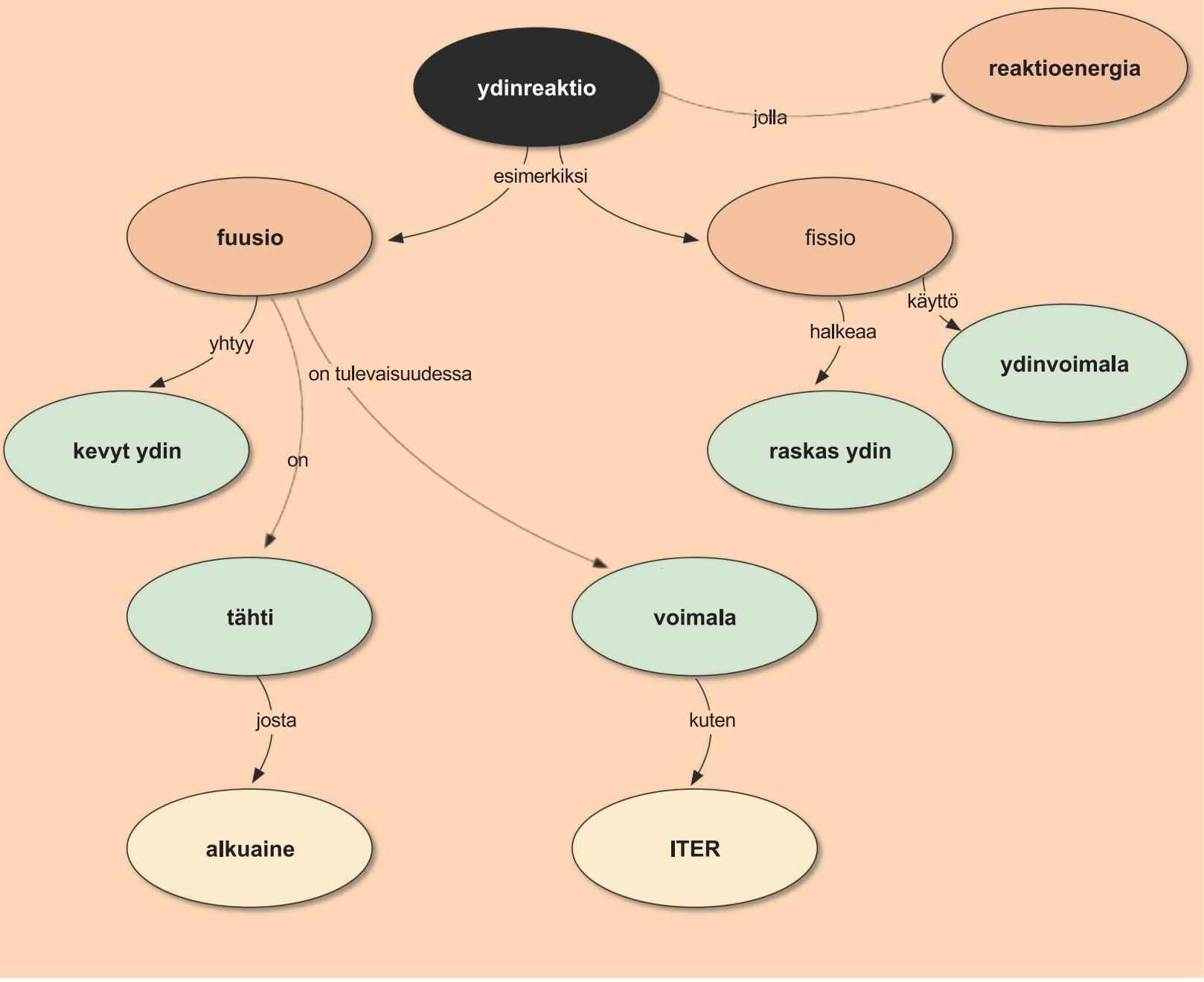
Jos polttaa puuta tai kivihiiltä, se vapauttaa kemiallisia sidoksia, joilla molekyylit pysyvät yhdessä.

Fuusio puolestaan vapauttaa runsaasti kerralla energiaa, jolla protonit ja neutronit pysyvät yhdessä atomin ytimessä.

►Auringossa 600 miljoonaa tonnia vetyä fuusioituu heliumiksi joka sekunti. Tuo energia elättää maapallon biosfääriä, siis meitäkin.

►Deuterium ja tritium ovat vedyn raskaita isotooppeja. Niissä on yksi ja kaksi neutronia atomiytimen protonia kohti. Grammasta deuterium-tritiumia saa energiaa lähes 100 000 kilowattituntia.

YHTEENVETO


ydinreaktio
jolla
reaktioenergia
esimerkiksi
fuusio
fissio
käyttö
halkeaa
yhtyy
on tulevaisuudessa
ydinvoimala
kevyt ydin
on
raskas ydin
tähti
voimala
josta
kuten
alkuaine
ITER

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- fuusio
- fissio
- ketjureaktio

6.1

1. Mitä tarkoittaa
a) fuusio
b) fissio?

2. Miksi kevyiden ytimien fuusio on mahdollinen?

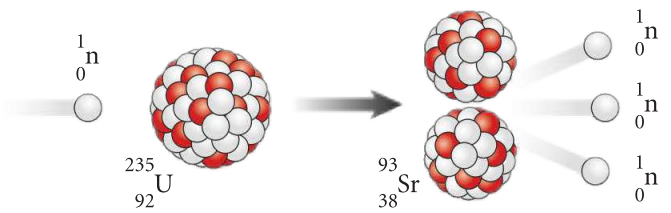
3. Mitä ketjureaktio tarkoittaa? Mitkä sen edellytykset ovat?

4. Mitä tarkoittaa ydinreaktion reaktioenergia? Miten se lasketaan?

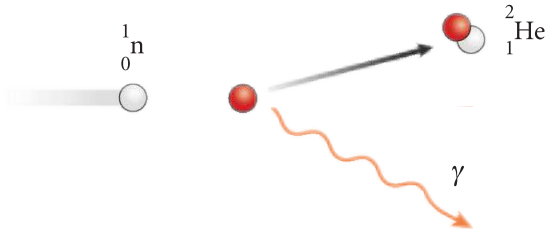
5. Kuinka paljon koivuhalkoja tarvitaan, jotta niitä polttamalla saadaan sama energia kuin yhden deuterium– ja tritium–ytimen fuusioreaktiosta?

6. Ovatko kuvien reaktiot fuusioita vai fissioita? Kirjoita reaktioita kuvaavat reaktioyhtälöt.

a)



b)



7. Laske fissioreaktion

$$^{238}\mathrm{U} \rightarrow {}^{145}\mathrm{La} + {}^{90}\mathrm{Br} + 3\mathrm{n}$$

reaktioenergia.

^{145}La massa on 144,921643 u ja ^{90}Br massa on 89,931015 u.

6.2

8. Mitä yhteisiä piirteitä ja erilaisuuksia on
a) hiilivoimalalla ja ydinvoimalalla
b) vesivoimalaitoksella ja ydinvoimalla?

9. Mitä tarkoittaa ydinreaktorin
a) hidaste
b) polttoainesauva
c) jäähdyte?

10. Mikä on painevesireaktorin ja kiehutusvesireaktorin perusero?

11. Kun yksi kilogramma hiiltä poltetaan, vapautuu $3{,}0 \cdot 10^7$ J energiaa. Jokaisessa uraani-235:n ytimen fissiossa vapautuu energiaa $2{,}0 \cdot 10^2$ MeV. Kuinka monta kilogrammaa hiiltä pitää polttaa, jotta saadaan sama energia kuin 1,0 kg uraani-235:n fissiosta?

12. Ydinreaktorissa kiertävä vesi lämpenee lämpötilasta 216 °C lämpötilaan 287 °C. Reaktori tuottaa energiaa teholla $5{,}6 \cdot 10^9$ W. Veden ominaislämpökapasiteetti ko. lämpötila-alueessa on 4 420 J/(kg°C). Kuinka paljon vettä kulkee reaktorin läpi sekunnissa?

13. Ydinvoimalan hyötysuhde on 25 %, jolloin 25 % ydinfissiosta vapautuvasta energiasta saadaan sähköenergiaksi. Voimalaitoksen teho on $8{,}0 \cdot 10^8$ W. Jos kustakin uraani-235:n ytimen fissiosta vapautuu energiaa $2{,}0 \cdot 10^2$ MeV, kuinka monta kilogrammaa uraania kuluu vuodessa?

14. Loviisan ydinvoimalan yksikkö tuottaa sähköenergiaa teholla 400 MW. Kuinka paljon uraani-235:tä kuluu vuorokaudessa, kun sähköntuoton hyötysuhde on 30 %? Yhden uraaniytimen fissiossa vapautuu energiaa 200 MeV.

15. Tutki esimerkiksi internetin avulla Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden saastelaskeuman kulkua. Missä osissa Suomea laskeuma oli suurin? Missä päin Eurooppaa laskeuma oli suurin? Miksi onnettomuuden vaikutukset ulottuivat hyvin laajalle alueelle?

6.3

16. Auringossa neljä miljoonaa tonnia vetyä muuttuu sekunnissa energiaksi. Osoita, että Auringon kokonaisteho on noin $3{,}9 \cdot 10^{26}$ W.

17. Olkiluodon uuden ydinvoimalan sähköntuotto vuodessa on 13 TWh. Vertaa tätä Auringon energiantuotantoon.

18. Miten alkuaineet ovat syntyneet? Voivatko alkuaineet hävitä?

19. Mikä on tokamak?

20. Tutki internetin avulla ITER-reaktorin nykyvaihetta.

7

Hiukkas-fysiikka

Monet fysiikan tutkijat selvittävät maailmankaikkeuden rakenteen ja synnyn arvoituksia. Kaikki maailmankaikkeudessa havaittu materia koostuu kvarkeista ja leptoneista. Kvarkeista rakentuu myös paljon hiukkasia, joilla ei näytä nykytiedon mukaan olevan mitään merkitystä maailmankaikkeudessa.

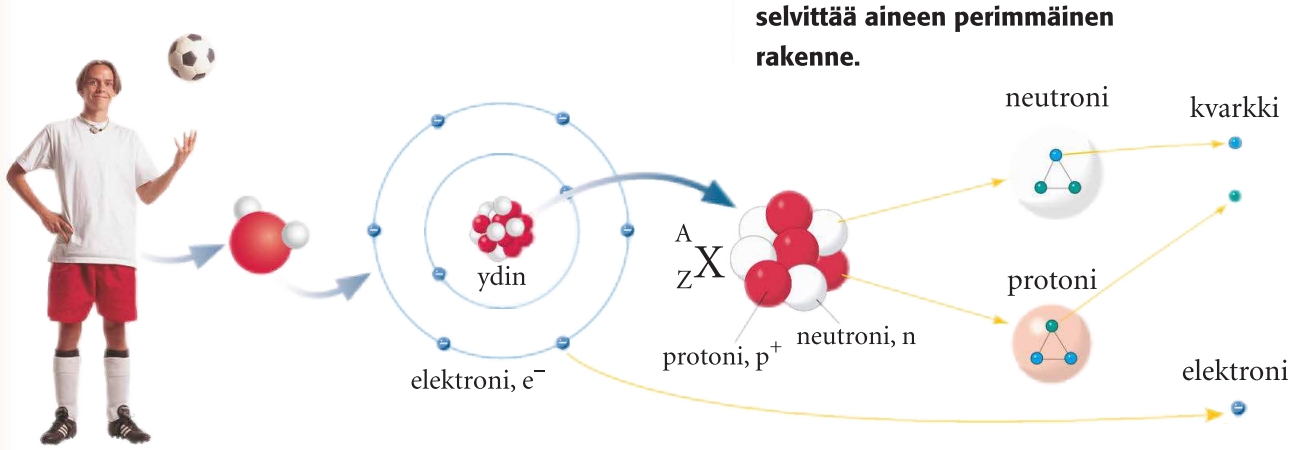
Tässä luvussa tutustutaan aineen pienimpiin rakennehiukkasiin, hiukkastutkimukseen ja suhteellisuusteoriaan.

7.1 Fysiikan hiukkaset

Nykyfysiikan yksi keskeisistä tutkimusalueista on **hiukkasfysiikka**. Hiukkasfysiikan piiriin kuuluvia hiukkasia ovat esimerkiksi aineen ja säteilyn pienimmät osaset. Jopa satojen fyysikoiden muodostamat tutkimusryhmät hankkivat suurilla koelaitteistoilla tietoa hiukkasista, joita on yhä vaikeampi havaita. Näitä tietoja tarvitaan muun muassa aineen rakenteen ja maailmankaikkeuden syntyhetkien syvempään ymmärtämiseen.

▲ **Hiukkaset voivat reagoida kohdatessaan, jolloin syntyy uusia hiukkasia. Kun reaktio tapahtuu magneettikentässä, hiukkasten ratojen kaartumisesta saadaan tietoa esimerkiksi niiden nopeuksista, massoista ja sähkövarauksista.**

▼ **Yksi fysiikan tavoitteista on selvittää aineen perimmäinen rakenne.**



HIUKKASFYSIIKAN HISTORIAA

1890	1900	1910	1920
John Joseph Thomson tunnistaa katodisäteet elektronisuihkuksi.	**Ernest Rutherford** erottaa radioaktiivisen aineen säteilystä kahdenlaista hiukkassäteilyä: alfa- ja beetasäteilyn. Albert Einstein esittää sähkömagneettisen säteilyn hiukkasmallin.	Rutherford löytää protonin.	Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen hiukkasmalli, jonka mukaan fotonit välittävät vuorovaikutusta.

Alkeishiukkaset

Nykyisin tunnetaan satoja erilaisia hiukkasia, joista osan merkitys maailmankaikkeudessa on edelleen tuntematon. Maailmankaikkeudessa olevan tunnetun aineen rakentumiseen tiedetään tarvittavan vain muutamia näistä hiukkaslajeista.

Hiukkaset otettiin käyttöön fysiikan teorioihin aineen rakennetta ja säteilyä selittävinä malleina. Ensimmäinen kokeellisesti todennettu hiukkanen oli **elektroni**, joka havaittiin vuonna 1897. Se löydettiin tutkittaessa katodisäteitä, jotka lähtivät tyhjiöputken sähköisesti varatusta metallikohtiosta. Kokeessa katodisäteiden annettiin kulkea säteitä vastaan kohtisuoran magneettikentän läpi. Havaittiin, että säteet kaartuivat, ja katodisäteilyn pääteltiin koostuvan varauksellisista hiukkasista. Koska säteily irtosi kiinteästä aineesta, säteilyhiukkasten uskottiin olevan aineen rakenneosia.

Atomiytimen rakennehiukkaset, **protonit** ja **neutronit**, havaittiin kokeellisesti selvästi myöhemmin kuin elektroni. Protonin löytämiseen johtavat kokeet tehtiin 1910-luvulla, ja neutronin löytämiseen johtavat vuosina 1930–32. Protonin löytyminen perustui Rutherfordin kokeeseen (katso sivu 45). Neutroni löydettiin, kun havaittiin, että kevyestä alkuaineesta tehtyyn kappaleeseen kohdistuva alfasäteily synnyttää hyvin läpitunkevaa säteilyä. Sähkö- ja magneettikenttä ei vaikuttanut tämän säteilyn etenemiseen. Myöhemmin säteilyn ymmärrettiin koostuvan aiemmin tuntemattomista hiukkasista, neutroneista.

Hiukkaset liittyvät fysiikkaan hyvin perustavalla tavalla, sillä myös sähkömagneettisen säteilyn eräät ominaisuudet voitiin selittää vain hiukkasmallin avulla. Lisäksi hiukkasten väliset vuorovaikutukset voidaan selittää käyttämällä välittäjähiukkasmallia (katso luku 8).

Perushiukkaset

Hiukkasten ryhmitteleminen niiden ominaisuuksien perusteella johti **kvarkkiteoriaan**, jonka mukaan valtaosa eri hiukkasista koostuu vielä pienemmistä hiukkasista, **kvarkeista**. Loput hiukkaset ovat joko **leptoneita** tai **vuorovaikutusten välittäjähiukkasia**. Nykyisen käsityksen mukaan leptoneilla ja kvarkeilla ei ole sisäistä rakennetta, eli ne ovat jakamattomia. Kvarkkeja ja leptoneita kutsutaan perushiukkasiksi.

Hiukkaslajit

Kaikki tunnetut hiukkaset ovat joko leptoneita tai vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, tai ne koostuvat kvarkeista.

Kaikilla kvarkeilla ja leptoneilla on **antihiukkanen**. Antihiukkasen varaus on hiukkasen varaukselle vastakkaismerkkinen, mutta hiukkasen ja sen antihiukkasen massa on yhtä suuri. Ympäristössämme ei juurikaan ole antihiukkasia, koska hiukkasen ja antihiukkasen kohdatessa ne katoavat, ja niiden massan energia muuttuu kokonaan kahden gammakvantin energiaksi. Näin käy esimerkiksi beetaplushajoamisessa syntyvälle positronille, kun se kohtaa elektronin. Tämä tapahtuma on **annihilaatio**.

1930

Wolfgang Pauli ennustaa neutriinon olemassaolon.

Paul Dirac ennustaa positronin olemassaolon.

James Chadwick löytää neutronin.

Caarl Andersson havaitsee positronin.

Hideki Yukawa esittää vahvan vuorovaikutuksen mallin, jossa välittäjähiukkasena on pioni.

Andersson löytää myonin kosmisesta säteilystä.

1940

Pioni havaitaan.

1950

Hiukkasten väestöräjähdys.

Neutriino havaitaan.

1960

Teoria kvarkeista.

Murray Gell-Mann esittää kvarkkiteorian.

1970

Ensimmäiset kvarkit havaitaan kokeellisesti.

Leptonit

Elektronit ja radioaktiivisten ydinten hajotessa syntyvät neutriinot ovat leptoneita. Leptoneita on kaikkiaan kuusi lajia: elektroni, myoni, tauhiukkanen ja kolme erilaista neutriinoa.

Hiukkanen	Tunnus	Sähkövaraus (e)
elektroni	e^-	–1
elektronin neutriino	ν_e	0
myoni	μ^-	–1
myonin neutriino	ν_μ	0
tau	τ^-	–1
taun neutriino	ν_τ	0

▲ **Leptoneita on kuusi lajia, joista puolet on neutriinoja. Neutriinoilla ei ole sähkövarausta. Muiden leptonien sähkövaraus on –1 e.**

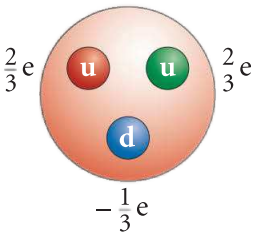
Kvarkit

Useimmat hiukkasista koostuvat kvarkeista. Kvarkkilajeja on kuusi: ylös u, alas d, lumo c, outo s, huippu t (eli totuus) ja pohja b (eli kauneus). Kvarkkien lajeja sanotaan myös kvarkkien **mauiksi**. Kvarkin sähkövaraus on joko $+\frac{2}{3}\mathrm{e}$ tai $-\frac{1}{3}\mathrm{e}$.

Hiukkanen (maku)	Tunnus	Sähkövaraus (e)
ylös	u	+2/3
alas	d	–1/3
lumo	c	+2/3
outo	s	–1/3
huippu	t	+2/3
pohja	b	–1/3

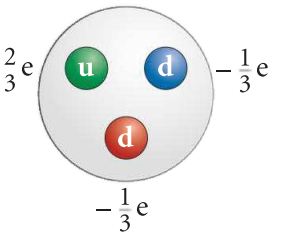
▲ **Kvarkkilajeja on kuusi. Viimeisenä niistä havaittiin kokeellisesti huippukvarkki.**

Niitä hiukkasia, jotka koostuvat kvarkeista, sanotaan **hadroneiksi**. Sekä protonit että neutronit ovat hadroneita. Tiedetään, että kvarkit voivat muodostaa hiukkasia joko kahden tai kolmen kvarkin yhdistelminä. Jos hiukkanen koostuu kahdesta kvarkista, toinen kvarkeista on aina antikvarkki ja toinen ei. Nykyisen tiedon mukaan kvarkit eivät voi esiintyä vapaina.



protonin kvarkkirakenne

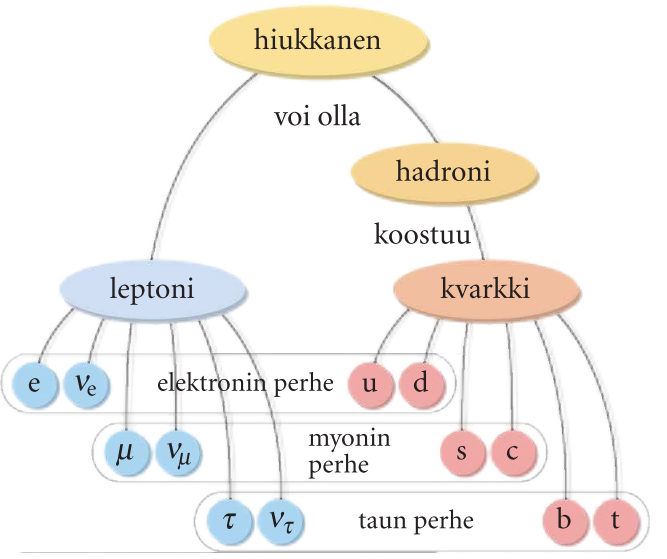
$$\frac{2}{3}\mathrm{e} + \frac{2}{3}\mathrm{e} + \left(-\frac{1}{3}\mathrm{e}\right) = 1\,\mathrm{e}$$



neutronin kvarkkirakenne

$$\frac{2}{3}\mathrm{e} + \left(-\frac{1}{3}\mathrm{e}\right) + \left(-\frac{1}{3}\mathrm{e}\right) = 0\,\mathrm{e}$$

◀ **Protonin ja neutronin kvarkkirakenne**



◀ **Leptonit ja kvarkit muodostavat yhdessä kolme perhettä. Ylös- ja alaskvarkki kuuluvat elektronin perheeseen, johon kuuluu myös elektronin neutriino. Lumo- ja outokvarkki sekä myoni ja sen neutriino muodostavat myonien perheen. Taun perheeseen kuuluvat huippu- ja pohjakvarkki sekä tau ja sen neutriino.**

Hiukkasten pysyvyys

Valtaosa löydetyistä hiukkaslajeista on hyvin lyhytikäisiä. Yksittäisen hiukkasen elinikää ei voi ennustaa, sillä hiukkasen hajoamiselle tietyn ajan kuluessa voidaan vain kertoa tietty todennäköisyys. Suuren hiukkasmäärän vähenemistä, kuten radioaktiivisen aineen hajoamista, voidaan kuvata havainnollisesti suureella puoliintumisaika. Yksittäisten hiukkasten kohdalla kuvaavampi suure on kuitenkin **keskielinaika**, joka on hajoamisvakion käänteisarvo.

Hiukkasen keskielinaika

$$\tau = \frac{1}{\lambda},$$

jossa

τ on hiukkasen elinaika ja

λ hiukkaslajin hajoamisvakio.

Ydinhiukkasista vain protoni on vapaana pysyvä eli hajoamaton hiukkanen. Vapaan neutronin keskielinaika on 14,93 minuuttia. Ytimessä neutronien ja protonien välinen jatkuva vuorovaikutus mahdollistaa sen, että ytimessä olevat neutronit pysyvät koossa.

Perusvuorovaikutukset

Hiukkaset voivat vuorovaikuttaa keskenään neljällä eri tavalla. Ne ovat **gravitaatiovuorovaikutus, sähkömagneettinen vuorovaikutus, vahva vuorovaikutus ja heikko vuorovaikutus**. Kaikki mikroskooppiset ja makroskooppiset vuorovaikutukset voidaan selittää näiden neljän vuorovaikutuksen avulla, ja siksi niitä sanotaan **perusvuorovaikutuksiksi**.

Perusvuorovaikutukset ovat etävuorovaikutuksia. Mikään niistä ei siis edellytä kappaleiden välistä kosketusta.

Gravitaation ja sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kantama on ääretön. Esimerkiksi Auringon vetovoima ulottuu paitsi aurinkokunnan äärimmäisiin kiertolaisiin myös hyvin heikkona maailmankaikkeuden jokaiseen muuhun kappaleeseen. Vahvan ja heikon vuorovaikutuksen kantamat ovat sen sijaan hyvin lyhyet.

Gravitaatio

Gravitaatio on vallitseva vuorovaikutus kosmisessa mittakaavassa, ja se on ainoa merkittävä vuorovaikutus taivaankappaleiden välillä.

Gravitaation aiheuttamat voimat ovat merkittäviä vain silloin, kun ainakin toisen vuorovaikuttavan osapuolen massa on hyvin suuri. Gravitaation aiheuttama painovoima on Maan päällä merkittävä ihmisen mittakaavassa ja vähän pienemmissäkin suuruusluokissa. Gravitaatio vaikuttaa tietenkin kaikkien massallisten kappaleiden välillä, mutta tässä luvussa tarkasteltavien hiukkasten tapauksessa muut vuorovaikutukset ovat paljon voimakkaampia.

Gravitaatiovoima on kääntäen verrannollinen kappaleiden välisen etäisyyden neliöön, joten se heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa.

Sähkömagneettinen vuorovaikutus

Kappaleet tai hiukkaset joilla on sähkövaraus, vuorovaikuttavat sähköisesti. Sähkövarausta on kaksi lajia, positiivinen ja negatiivinen. Sähköinen voima voi olla joko veto- tai poistovoima. ”Gravitaatiovarausta” eli massaa on vain yksi laji, ja gravitaatiovoima on aina vetovoima.

Vahva vuorovaikutus

Vahva vuorovaikutus on hallitseva kvarkkien välinen vuorovaikutus. Vahvan vuorovaikutuksen seurausta on myös ydinhiukkasten välinen vetovoima, ydinvoima. Ydinvoiman kantama on hyvin lyhyt. Se on samaa suuruusluokkaa kuin protonin läpimitta eli 10^{-15} m. Jos protonit ovat yli femtometrin päässä toisistaan, ne pyrkivät toisistaan poispäin sähköisen voiman vuoksi.

Heikko vuorovaikutus

Heikko vuorovaikutus on nimensä mukaisesti vahvaa ja sähkömagneettista vuorovaikutusta heikompi, ja sen kantama on lyhyt. Heikon vuorovaikutuksen kantama on vain noin 10^{-18} m, joka on noin 0,1 % protonin läpimitasta. Heikosti vuorovaikuttavien hiukkasten pitää siis olla hyvin lähellä toisiaan.

Heikon vuorovaikutuksen kokevat niin kvarkit kuin leptonitkin, mutta lyhyen kantaman vuoksi heikko vuorovaikutus on yleisintä ydinhiukkasten sisällä olevien kvarkkien välillä.

Tehtäviä ➢ 1, 2, 3, 4, 5

7.2 Hiukkastutkimus

Hiukkasilmaisimet

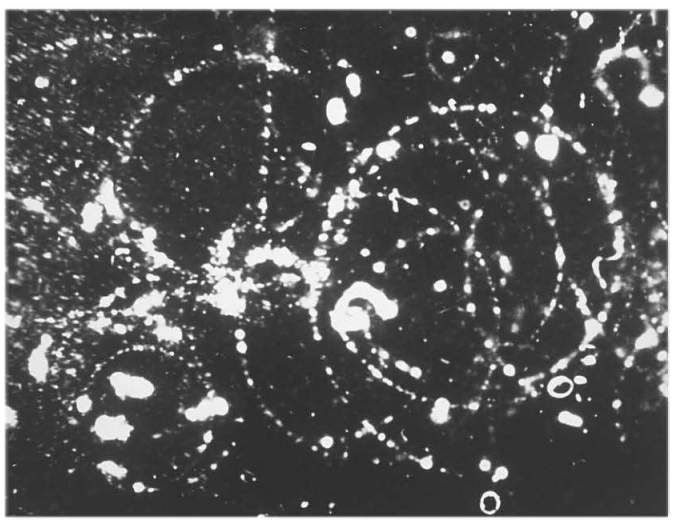
Hiukkasten havaitseminen perustuu niiden vuorovaikutukseen aineen kanssa. Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa sitä, että hiukkasen osuessa sopivasti valittuun aineeseen se aiheuttaa signaalin, esimerkiksi sähköpurkauksen, joka voidaan havaita. Tällainen **signaali-ilmaisin** on esimerkiksi radioaktiivisuuden mittaamiseen käytetty Geiger-putki.

Signaali-ilmaisimilla ei voida seurata hiukkasten etenemistä. Sopivissa oloissa hiukkanen vuorovaikuttaa useiden atomien kanssa niin, että hiukkasen radasta jää jälki. Tällaisia ilmaisimia sanotaan **ratailmaisimiksi**.

Hiukkasilmaisimet

Hiukkasia voidaan havaita joko signaali-ilmaisimilla tai ratailmaisimilla.

Ensimmäinen ratailmaisin oli vuonna 1912 keksitty sumukammio. Siinä hiukkanen kulkee ylikylläisen vesihöyryn täyttämässä tilassa ja jättää jälkeensä tiivistyneiden vesipisaroiden vanan.



▲ **Sumukammiossa hiukkasten jäljet ovat leveitä ja yleensä epäselviä. Tämä vuodelta 1927 oleva kuva on yksi ensimmäisistä sumukammiokuvista. Kuvan kaaret ovat voimakkaassa magneettikentässä olevien elektronien jälkiä. Elektronit ovat saaneet liike-energian kosmisen säteilyn gammakvanteilta.**

Sumukammion korvasi vuonna 1952 keksitty kuplakammio. Siinä hiukkasten jäljet syntyvät ylikuumennettuun nesteeseen syntyneiden kuplien jonoina. Kuplakammiossa jälki on huomattavasti terävämpi kuin sumukammiossa, jolloin mittaustarkkuus on merkittävästi parempi. Nykyisin kuplakammiot ovat suuria nestemäisellä vedyllä täytettyjä säiliöitä, joissa on eri puolilla ikkunoita. Näistä ikkunoista kuvataan samanaikaisesti hiukkasten jättämiä jälkiä eri suunnista.

◀ **Kuplakammiossa hiukkasten ratojen jäljet ovat teräviä. Ratojen kaarevuuden määrittäminen kuplakammiokuvista on pitkään ollut käsityötä.**

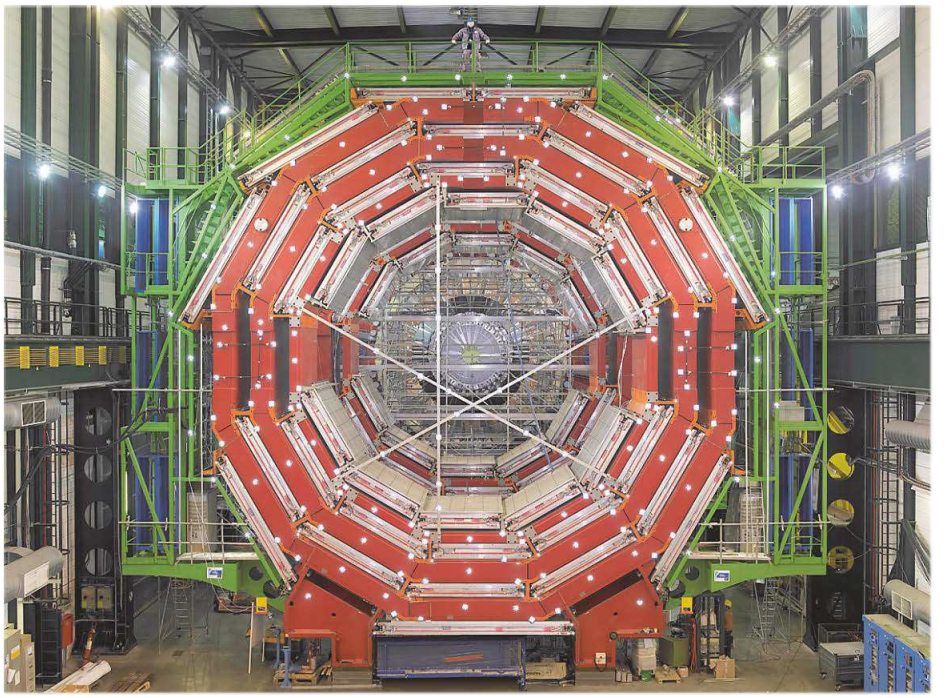
Nykyisin käytössä olevat ratailmaisimet ovat monimutkaisia sähköisiä ilmaisimia, jotka ovat yleisimmin joko kaasutäytteisiä ilmaisimia tai puolijohdeilmaisimia. Kaasutäytteisessä ilmaisimessa on suuri määrä elektrodeja, joille hiukkasen ionisoimat kaasuatomit ajautuvat. Puolijohdeilmaisimissa puolestaan hiukkanen synnyttää elektroni-aukko-pareja. Näiden perustella voidaan selvittää, mistä hiukkanen on kulkenut.

Ratailmaisimet

Hiukkasfysiikan alkuvuosina käytettyjä ratailmaisimia olivat

- sumukammio ja kuplakammio.

Nykyisin ilmaisimet ovat sähköisiä ilmaisimia, joista yleisimmät tyypit ovat kaasutäytteinen ilmaisin ja puolijohdeilmaisin.



▲ **Osa CERN:ssä olevasta CMS-ilmaisimesta (*compact muon solenoid*), joka asennetaan rakenteilla olevaan LHC-törmäyttimeen (*large hadron collider*).**

Hiukkaskiihdyttimet

Hiukkasia tutkitaan törmäyttämällä niitä toisiinsa, jolloin tapahtuvissa hiukkasreaktioissa syntyy uusia hiukkasia. Törmäyksissä hiukkasten liike-energiaa vapautuu reaktion aikaansaamiseksi tarvittavaksi energiaksi. Jotta reaktioissa olisi käytössä mahdollisimman suuria energioita, hiukkasten liike-energiat pyritään saamaan mahdollisimman suuriksi ennen törmäystä. Tähän käytetään hiukkaskiihdyttimiä.

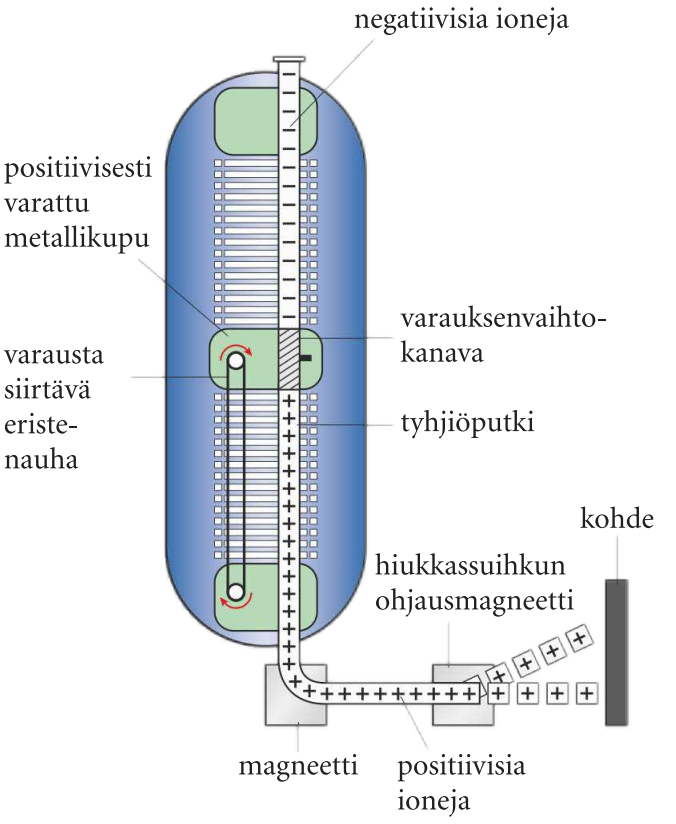
Kaikissa hiukkaskiihdyttimissä **hiukkasten kiihdyttämiseen käytetään sähkökenttiä**. Ja jos hiukkasten **liikkeen suuntaa muutetaan**, se tehdään **magneettikenttien avulla**. Kiihdytettävien hiukkasten on siksi oltava sähköisesti varattuja.

Kiihdytettävät varatut hiukkaset ovat nykyisin tutkimustarkoituksiin käytettävissä kiihdyttimissä elektroneja, protoneja tai yksiatomisia ioneja. Ioneja saadaan kuumentamalla hyvin puhdasta alkuainenäytettä. Esimerkiksi CERN:n LHC-kiihdyttimessä tullaan käyttämään lyijy-54 -ioneja, joita tuotetaan kuumentamalla lyijynäyte 550 °C:een lämpötilaan. Syntyvä lyijyhöyry ionisoidaan elektronisuihkun avulla.

Erilaisia hiukkaskiihdyttimiä on nykyisin käytössä maailmalla eri tarkoituksiin noin 17 000. Yksinkertaisin tapa luokitella kiihdyttimet on jakaa ne **lineaarikiihdyttimiin** ja **kehäkiihdyttimiin**. Lineaarikiihdyttimissä hiukkaset etenevät kiihdytyksen aikana suoraviivaisesti, kun taas kehäkiihdyttimissä hiukkaset kiertävät joko ympyrärataa tai rataa, jossa radan säde kasvaa koko ajan. Lineaarikiihdyttimissä käytetään siten vain sähkökenttiä.

Lineaarikiihdyttimiä ovat esimerkiksi Van de Graaff -kiihdyttimet ja niin sanotut Linac-kiihdyttimet. Elektronien kiihdyttämiseen käytetään yleensä lineaarikiihdyttimiä, ellei tarkoitus ole tuottaa nopeasti kaarevalla radalla liikkuvien elektronien lähettämää jarrutussäteilyn kaltaista synkrotronisäteilyä.

Tandem Van de Graaff- kiihdytin on käytössä muun muassa Helsingin yliopiston kiihdytinlaboratoriossa. Kiihdyttävä sähkökenttä saadaan aikaan kiihdyttimen keskellä olevaan metallikupuun kerätyn positiivisen sähkövarauksen avulla. Tyhjiöputkeen tuotetaan negatiivisia ioneja, joihin kohdistuva sähköinen voima kiihdyttää niitä kohti varattua kupua (kuvassa alaspäin). Kuvun sisällä ionit osuvat ohueen hiilikalvoon, jossa ionit menettävät elektroneja, ja osa niistä muuttuu positiivisiksi. Niihin kohdistuva sähköinen voima kiihdyttää ioneja edelleen poispäin kuvusta (kuvassa alaspäin). Näin kahdessa vaiheessa kiihdytetyt ionit ohjataan magneettikenttien avulla kohtioihin, joihin ionien halutaan törmäävän.



▲ **Tyypillinen Van de Graaff-kiihdytin on niin sanottu tandem Van de Graaff.**

Ensimmäinen kehäkiihdytin oli sähkömagnetismin kurssilla käsitelty syklotroni. Nykyisinkin monissa laboratorioissa hiukkasten kiihdyttämiseen käytetään syklotronin kehittyneempää versiota, synkrosyklotronia.

Suurimmat kehäkiihdyttimet ovat synkrotroneja, joista suurin on Genevessä sijaitseva CERN:n halkaisijaltaan 27 km:n kokoinen LHC-kiihdytin. Synkrotroneissa hiukkaset kiertävät samaa rataa, ja siinä kiihdyttävät sähkökentät ja ohjaavat magneettikentät ovat eri kohdissa.

Hiukkaskiihdyttimet

Kiihdyttimet voivat olla:
1. lineaarikiihdyttimiä, joita ovat
   - Linac
   - Van De Graaff -kiihdytin
2. kehäkiihdyttimiä, joita ovat
   - syklotroni
   - synkrosyklotroni
   - synkrotroni.

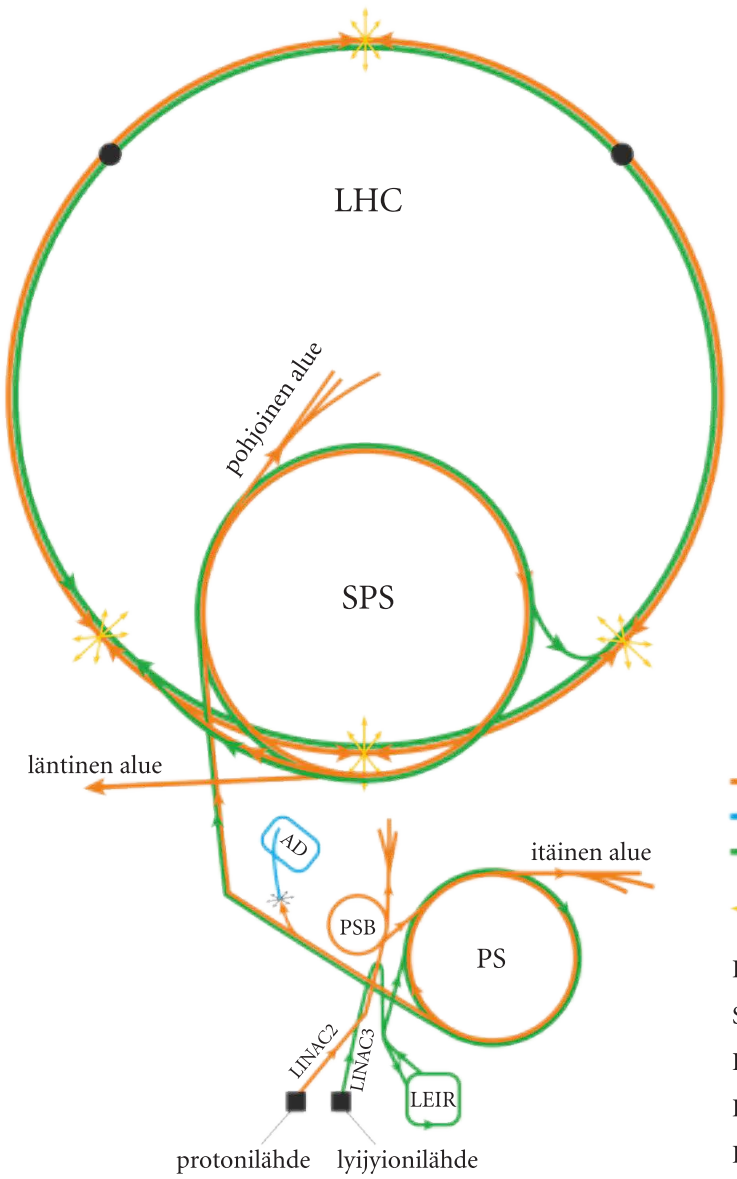
Törmäyttimet

Hiukkasia tutkitaan lähinnä tilanteissa, joissa hiukkasten törmätessä tapahtuvissa reaktioissa syntyy uusia hiukkasia. Törmäys voi olla joko liikkuvien hiukkasten törmäys paikallaan olevaan kohteeseen tai kahden vastakkaiseen suuntaan liikkuvan hiukkassuihkun törmäys. Jälkimmäisessä hiukkasten liike-energia voidaan saada kokonaan reaktion energiaksi. Levossa olevaan kohteeseen törmättäessä osa liike-energiasta jää väistämättä hiukkasille liikemäärän säilymisen vuoksi.

Törmäysasemilla pyritään siihen, että yhtään reaktiossa syntynyttä hiukkasta ei pääse pakoon huomaamatta. Siksi törmäysasemien kohdalla on ratailmaisimien lisäksi kalorimetri-ilmaisimia, jotka pysäyttävät niihin tulevat hiukkaset kokonaan ja luovuttavat energian ympäröivällä aineelle. Lisäksi törmäysasemissa saadaan tietoa hiukkasista niiden lähettämän säteilyn perusteella.

Hiukkastutkimuskeskuksia maailmalla

CERN Geneve, Sveitsi
SLAC Stanford, USA
Fermilab Chicago, USA
DESY Hampuri, Saksa
Brookhaven Long Island, USA
KEK Tsukuba, Japani
INFN Gran-Sasso, Italia



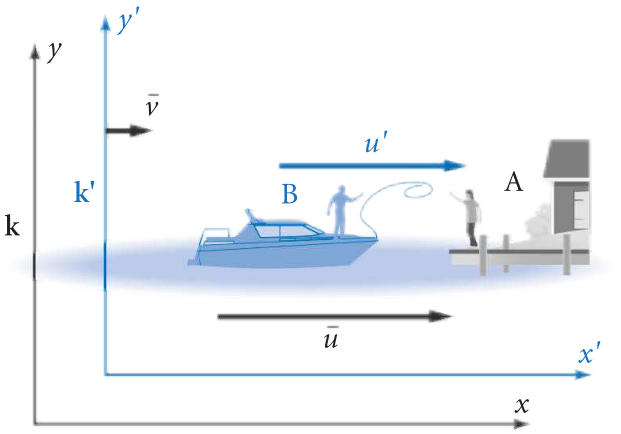
◀ CERNin hiukkastutkimuskeskuksessa hiukkasia kiihdytetään vaiheittain yhä suuremmilla kiihdyttimillä. Jokaisen kiihdyttimen jälkeen hiukkaset ohjataan seuraavaan kiihdyttimeen, kunnes ne ovat suurimmassa kehäkiihdyttimessä. Näin hiukkasten energia voidaan nostaa jopa 7 TeV:iin.

Tehtäviä ➢ 6, 7, 8, 9, 10

7.3 Suppea suhteellisuusteoria

Hiukkasia tutkittaessa niitä kiihdytetään hyvin suuriin nopeuksiin, ja ne saavat erittäin suuria liike-energioita. Suurissa nopeuksissa ne mallit, joita käytetään liikkeen kuvaamiseen klassisessa mekaniikassa, eivät enää päde.

Klassisessa mekaniikassa kahden havaitsijan liikkuessa toistensa suhteen tasaisesti voidaan siirtyä yhden havaitsijan koordinaatistosta toiseen yksinkertaisella nopeuksien yhteenlaskulla. Esimerkiksi jos laituria kohden nopeudella 0,5 m/s tulevasta veneestä heitetään laiturille köysinippu suoraan eteenpäin veneen suhteen nopeudella 2,0 m/s, nippu liikkuu laituriin nähden nopeudella 0,5 m/s + 2,0 m/s = 2,5 m/s. Tätä sanotaan klassisen mekaniikan suhteellisuusperiaatteeksi eli Galilein suhteellisuusperiaatteeksi.



▲ **Kahden toistensa suhteen liikkuvan havaitsijan havaintoja verrattaessa puhutaan näiden havaitsijoiden koordinaatistoista. Jos havaitsija A esimerkiksi seisoo laiturilla koordinaatistossa k ja havaitsija B seisoo sitä kohti nopeudella *v* tulevan veneen kannella koordinaatistossa k′, havaitsijoiden koordinaatistojen välinen nopeus on *v*. Jos veneestä heitetty köysinippu liikkuu veneen suhteen nopeudella *u*′, sen nopeus laiturilla seisovan havaitsijan koordinaatistossa on klassisen mekaniikan mukaan $u = u' + v$.**

Albert Einstein mietti jo nuorena sitä, voidaanko klassisen mekaniikan mukaista suhteellisuusperiaatetta soveltaa valon etenemiseen. Sähkömagnetismin teorian mukaan valo etenee tyhjiössä vakionopeudella *c*. Einstein huomasi tämän, ja otti tulevien pohdintojensa lähtökohdaksi, että valon nopeus on kaikille havaitsijoille sama. Tästä seuraa kuitenkin ristiriita.

Jos valon lähettäjä liikkuu maanpinnalla kohti havaitsijaa, klassisen mekaniikan suhteellisuusperiaatteen mukaan maanpinnan suhteen levossa olevan havaitsijan mittaaman valon nopeuden pitäisi olla valon tyhjiönopeuden ja lähettäjän nopeuden summa, joka olisi suurempi kuin *c*. Jos valon nopeus on todella sama kaikille havaitsijoille, joko sähkömagnetismin teoriassa on virhe tai klassinen mekaniikka ei päde tilanteissa, joissa kahden kappaleen välinen suhteellinen nopeus on hyvin suuri.

Sähkömagnetismin teoria oli kokeellisten havaintojen valossa todettu erittäin hyvin paikkansa pitäväksi, joten Einstein alkoi pohtia, miksi klassinen mekaniikka ei päde, kun kahden kappaleen välinen suhteellinen nopeus on suuri.

Näiden pohdintojen seurauksena syntyi 1905 **suppea suhteellisuusteoria**, joka pätee tasaisessa liikkeessä toistensa suhteen olevissa koordinaatistoissa eli inertiaalikoordinaatistoissa. Koordinaatisto on inertiaalinen, jos vapaat kappaleet liikkuvat siinä Newtonin ensimmäisen lain kuvaamalla tavalla. Suppean suhteellisuusteorian keskeisenä perustana on valonnopeuden vakioisuus.

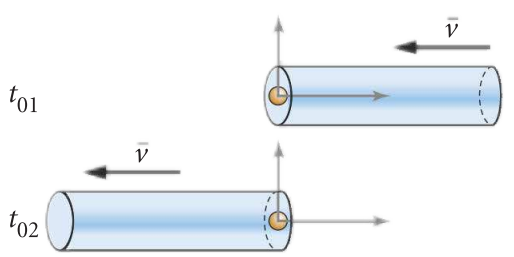
Valonnopeuden vakioisuus

Valo etenee kaikkien havaitsijoiden suhteen samalla nopeudella, eli valonnopeus ei riipu lähteen ja havaitsijan suhteellisesta liikkeestä.

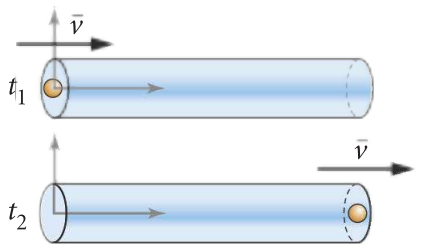
Edellä kuvattu ristiriita syntyy siitä, että klassisessa mekaniikassa aika etenee kaikissa koordinaatistoissa samalla tavalla ja etäisyydet ovat kaikissa koordinaatistoissa yhtä pitkät. Ristiriita häviää, jos hyväksytään se, että **mitatut aikavälit tai matkat tai molemmat voivat saada eri koordinaatistoissa eri arvot.**

Aikadilaatio

Tarkastellaan tilannetta, jossa hiukkanen etenee vakionopeudella tyhjiöputkessa. Hiukkasen mukana liikkuvassa koordinaatistossa saapuminen putkeen ja poistuminen putkesta tapahtuu samassa kohdassa, sillä hiukkanen on levossa tämän koordinaatiston suhteen. Merkitään näiden **tapahtumien** – putkeen saapumisen ja sieltä poistumisen – välistä aikaa tunnuksella Δt_0 . Tällaista samassa kohdassa sattuvien tapahtumien välistä aikaa sanotaan **itseisajaksi**.



▲ **Hiukkasen koordinaatistossa putki liikkuu vasemmalle nopeudella $\bar{v}$. Hetkellä t_{01} hiukkanen saapuu putkeen ja hetkellä t_{02} poistuu putkesta.**



▲ **Putken koordinaatistossa hiukkanen liikkuu oikealle nopeudella $\bar{v}$.**

Valonnopeuden vakioisuus johtaa siihen päätelmään (katso ekstra s. 143), että itseisaika Δt_0 on aina lyhyempi kuin tapahtumapaikan suhteen liikkuvassa koordinaatistossa mitattu aika Δt.

Aikadilaatio

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

jossa

v on tarkastelukoordinaatistojen välinen suhteellinen nopeus,

Δt_0 on itseisaika, eli tapahtumien välinen aika siinä koordinaatistossa, jossa ne sattuvat samassa paikassa ja

Δt on tapahtumien välinen aika siinä koordinaatistossa, jossa ne sattuvat eri paikoissa.

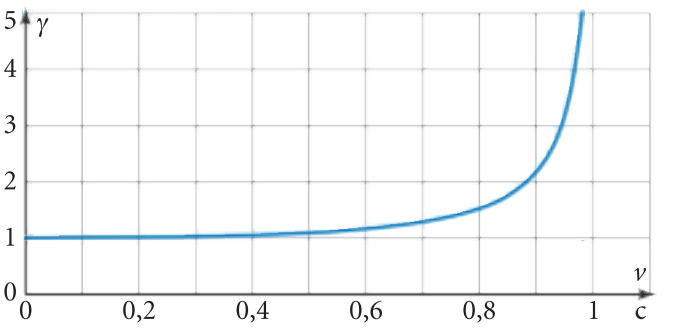
Aikadilaatio tarkoittaa ajan venymistä. Jos aikadilaation yhtälö kirjoitetaan muodossa

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 ,$$

siitä voidaan erottaa lauseke

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

joka esiintyy myös monissa muissa suppean suhteellisuusteorian yhtälöissä. Tätä lauseketta sanotaan **Lorentzin tekijäksi**, ja sen tunnus on γ. Lorentzin tekijän arvo poikkeaa merkittävästi yhdestä vain silloin, kun suhteellinen nopeus on lähellä valonnopeutta.



▲ **Lorentzin tekijän arvo kasvaa hyvin nopeasti suhteellisen nopeuden lähestyessä valonnopeutta.**

Aikadilaation olemassaolosta on paljon kokeellisia todisteita. Yksi varhaisimmista on myoneiksi kutsuttujen hiukkasten havaitseminen maanpinnalla. Myonit syntyvät Auringon säteilyn vaikutuksesta ilmakehässä usean kilometrin korkeudella maanpinnan yläpuolella. Kos-

ka myonien keskielinaika on vain 2,2 μs, pitäisi niiden klassisen mekaniikan ennusteen mukaan edetä paljon valonnopeutta suuremmalla nopeudella saavuttaakseen maanpinnan ennen hajoamistaan. Minkään kappaleen tai hiukkasen ei kuitenkaan tiedetä etenevän valonnopeutta suuremmalla nopeudella. Todellisuudessa myonien nopeus on maanpintaan nähden vähän valonnopeutta pienempi.

Aikadilaatio selittää ilmiön seuraavasti. **Maanpintaan sidotussa koordinaatistossa**, jossa myonien syntyminen ja osuminen maahan tapahtuvat eri kohdassa, näiden **tapahtumien välinen aika on pitempi kuin myonien koordinaatistossa. Myonien koordinaatistossa aika siis etenee hitaammin.** Myonien koordinaatistossa näiden tapahtumien välinen aika on alle kymmenesosa verrattuna aikaan, joka mitataan Maahan sidotussa koordinaatistossa. Näin myonit ehtivät maanpinnalle ennen hajoamistaan.

Esimerkki 1

Elektroni etenee hiukkaskiihdyttimen suoralla osalla eräässä vaiheessa nopeudella 0,92 c. Kuinka pitkä aika elektronin mukana liikkuvassa koordinaatistossa kuluu matkaan, johon tutkijoiden mittauksen mukaan kuluu 18 ns?

Ratkaisu

Aikadilaation yhtälön mukaan

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

jossa Δt_0 hiukkasen koordinaatistossa mitattu aika eli itseisaika ja Δt tutkijoiden mittaama aika. Ratkaisemalla yhtälöstä kysytty itseisaika saadaan

$$\begin{aligned}\Delta t_0 &= \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ &= 18 \cdot 10^{-9}\,\text{s} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0{,}92c)^2}{c^2}} \\ &= 7{,}0545 \cdot 10^{-9}\,\text{s} \approx 7{,}1\ \text{ns}.\end{aligned}$$

Vastaus

Hiukkasen mukana liikkuvassa koordinaatistossa kulunut aika on 7,1 ns.

Pituuskontraktio

Valonnopeuden vakioisuus kaikissa koordinaatistoissa johtaa toisaalta myös siihen päätelmään, että kappaleiden pituudet liikkeen suunnassa ovat liikkuvasta koordinaatistosta käsin mitattuna pienempiä kuin kappaleiden lepokoordinaatistosta mitattuna. Tätä ilmiötä sanotaan **pituuskontraktioksi**.

Maata kohti kiitävän myonin koordinaatistossa etäisyys sen syntykohdasta maanpinnalle on siten pienempi kuin maanpinnalta mitattu etäisyys. Sama ilmiö havaitaan myös hiukkaskiihdyttimissä: kiihdyttimessä kiitävän hiukkasen koordinaatistossa kiihdyttimen putki on lyhyempi kuin laboratorion koordinaatistossa. Kiihdytin on levossa laboratorion suhteen, mutta liikkuu hiukkasen suhteen. Kun kappaleen pituus mitataan sekä sen lepokoordinaatistossa että kappaleen suhteen liikkuvassa koordinaatistossa, saadaan lepokoordinaatistossa aina suurempi tulos.

Pituuskontraktio

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

jossa

- v on tarkastelukoordinaatistojen välinen suhteellinen nopeus,
- l_0 on kappaleen mitattu pituus sen lepokoordinaatistossa ja
- l on kappaleen pituuden suunnassa liikkuvassa koordinaatistossa mitattu kappaleen pituus.

Esimerkki 2

Hiukkanen etenee nopeudella 0,995 c tyhjiöputkessa, jonka laboratoriossa mitattu pituus on 2,8 km. Kuinka pitkä putki on hiukkasen koordinaatistossa mitattuna?

Ratkaisu

Pituuskontraktion yhtälön mukaan

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

jossa l_0 on laboratorion koordinaatistossa mitattu putken pituus ja l on putken pituus hiukkasen mukana liikkuvassa koordinaatistossa mitattuna.

Kysytty pituus on siten

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$= 2{,}8\ \text{km} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0{,}995c)^2}{c^2}}$$

$$= 0{,}2796\ \text{km} \approx 0{,}28\ \text{km}.$$

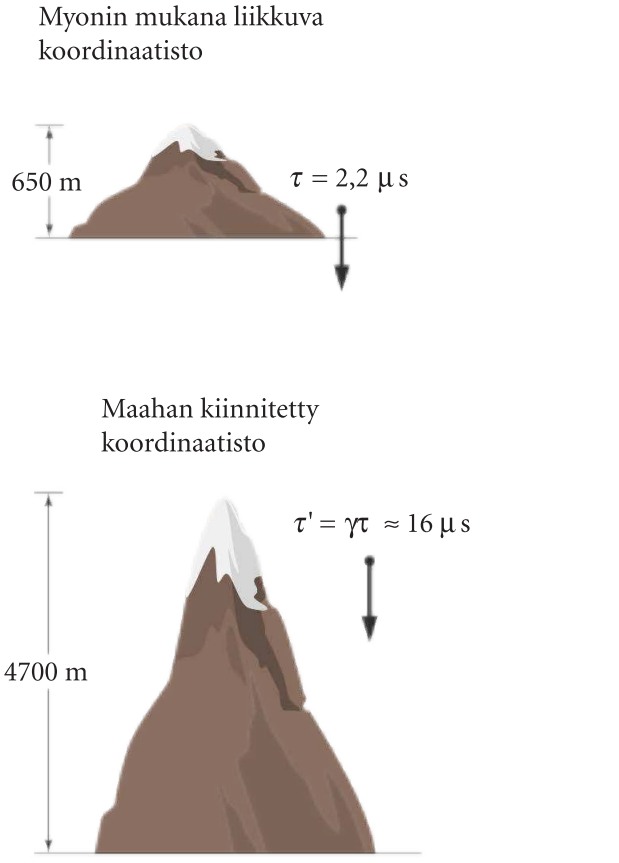
Vastaus

Hiukkasen mukana liikkuvassa koordinaatistossa mitattu putken pituus on 0,28 km.

Pituudet ja aikavälit

Mitattu pituus on aina suurin siinä koordinaatistossa, jossa mitattava kohde on levossa.

Mitattu aikaväli on aina lyhin siinä koordinaatistossa, jossa tapahtumat sattuvat samassa kohdassa.



▲ Maanpintaa kohden liikkuvien myonien koordinaatistossa vuoren korkeus on pienempi kuin maanpinnan suhteen levossa olevassa koordinaatistossa. Maan suhteen levossa olevassa koordinaatistossa puolestaan myonien matka-aika on suurempi kuin myonien mukana liikkuvassa koordinaatistossa.

Esimerkki 3

Myonit etenevät ilmakehässä nopeudella $0{,}9995\,c$. Myonien keskielinaika on $2{,}2\,\mu\text{s}$. Kuinka suuri osa ilmakehässä $60\,\text{km}$:n korkeudella syntyneistä myoneista osuu maahan?

Ratkaisu

Myonien nopeus on maanpinnan koordinaatistossa

$$v = \frac{x_0}{\Delta t},$$

jossa x_0 on syntykorkeuden etäisyys maanpinnasta ja Δt maanpinnalta mitattu myonien matkaan kuluttama aika. Maanpinnalta mitaten myonit ovat edenneet siten ajan

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{x_0}{v} \\ &= \frac{60\,000\ \text{m}}{0{,}9995 \cdot 299\,792\,458\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ &= 20{,}023858\ \mu\text{s}.\end{aligned}$$

Aikadilaation yhtälöstä

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

voidaan nyt ratkaista myonien etenemisen itseisaika

$$\begin{aligned}\Delta t_0 &= \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ &= 20{,}023858\ \mu\text{s} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0{,}9995c)^2}{c^2}} \\ &= 6{,}3313082\ \mu\text{s}.\end{aligned}$$

Koska hiukkasen keskielinaika on

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

ja hiukkasjoukon puoliintumisaika on

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

saadaan myonijoukon puoliintumisajaksi

$$\begin{aligned}\tau_{1/2} &= \tau \ln 2 \\ &= \ln 2 \cdot 2{,}2\ \mu\text{s} = 1{,}5249\ \mu\text{s}.\end{aligned}$$

Myonijoukko ehtii silloin puoliintua

$$\begin{aligned}&\frac{6{,}3313082\ \mu\text{s}}{1{,}5249\ \mu\text{s}} \\ &= 4{,}1519 \text{ kertaa}.\end{aligned}$$

Maanpinnalle saapuvien myonien osuus on

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{4{,}1519} = 0{,}0563.$$

Myoneista pääsee maahan siis noin $5{,}6\ \%$.

Vastaus

Maanpinnan saavuttaa myoneista noin $5{,}6\ \%$.

Nopeasti liikkuvien hiukkasten liikemäärä ja liike-energia

Hiukkasen nopeuden lähestyessä valonnopeutta hiukkasen liikemäärä ei kasva enää suoraan verrannollisena nopeuteen, eikä sen liike-energia kasvaa verrannollisena nopeuden neliöön. Hiukkasen nopeuden kasvaessa sekä hiukkasen liikemäärä että sen liike-energia lähestyvät ääretöntä sitä koskaan saavuttamatta. Hiukkaset eivät voi saavuttaa valonnopeutta, vaan liikkuvat aina sitä pienemmällä nopeudella.

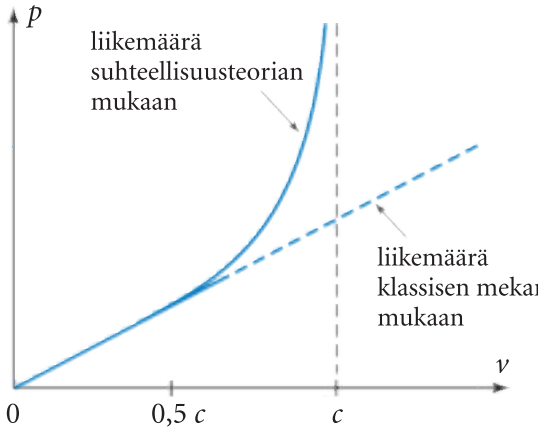
Hiukkasen liikemäärä noudattaa suurissa nopeuksissa lauseketta

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

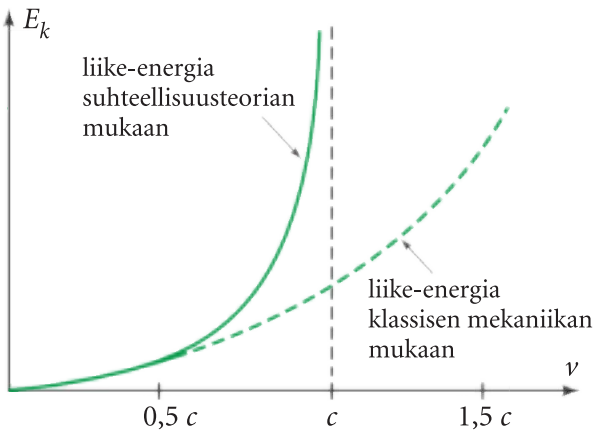
joka voidaan kirjoittaa lyhyesti muotoon

$$p = \gamma m v,$$

kun Lorentzin tekijälle käytetään tunnusta γ.



▲ **Hiukkasen nopeuden lähestyessä valonnopeutta liikemäärä kasvaa nopeammin kuin klassinen mekaniikka ennustaa.**



▲ **Valonnopeutta lähestyttäessä hiukkasen liike-energia kasvaa nopeammin kuin klassinen fysiikka ennustaa.**

Hiukkaskiihdyttimissä on otettava huomioon suhteellisuusteoreettinen liikemäärän kasvu. Klassisen mekaniikan mukaan syklotronssa kiihdytettävän hiukkasen liikeyhtälö on

$$QvB = m\frac{v^2}{r}.$$

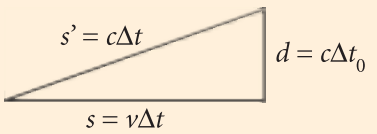
Suppean suhteellisuusteorian mukaan liikeyhtälö on kirjoitettava muodossa

$$QvB = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\frac{v^2}{r}.$$

Tehtäviä ➢ 11, 12, 13, 14, 15, 16

Kahden tapahtuman välinen aika on siis lyhin aina siinä koordinaatistossa, jossa tapahtumat sattuvat samassa paikassa. Vastaavasti pituus on suurin siinä koordinaatistossa, jossa välin päätepisteet eivät liiku havaitsijaan nähden. Näiden suureiden tunnuksena käytetään alaindeksiä nolla.

Aikadilaation yhtälö voidaan johtaa tarkastelemalla valopulssia, joka heijastelee kahden peilin välillä. Kun tällainen ”valokello” sijoitetaan junaan, joka liikkuu hyvin nopeasti, valonsäteen kulkema reitti näyttää junan mukana matkustavasta havaitsijasta erilaiselta kuin sivusta tarkkailevasta havaitsijasta (katso viereinen kuva). Tällöin junassa olevan havaitsijan mittauksen mukaan valonsäteellä kuluu aika Δt_0, kun se kulkee peilien välisen matkan. Koska valo etenee nopeudella c, peilien välinen matka voidaan esittää mitatun ajan avulla muodossa $d = c\Delta t_0$. Junan liikettä sivusta seuraavan havaitsija mittaa valonsäteen kulkevan tämän välin ajassa Δt, joten valonsäde etenee matkan $s' = c\Delta t$. Samalla hän on havainnut nopeudella v kulkevan junan edenneen matkan $s = v\Delta t$. Kuvan mukaan nämä matkat muodostavat suorakulmaisen kolmion, joten Pythagoran lauseen mukaan



$$c^2\Delta t^2 = c^2\Delta t_0{}^2 + v^2\Delta t^2 .$$

Kun tästä ratkaistaan aika Δt, saadaan

$$c^2\Delta t^2 - v^2\Delta t^2 = c^2\Delta t_0{}^2$$

$$\Delta t^2\left(c^2 - v^2\right) = c^2\Delta t_0{}^2$$

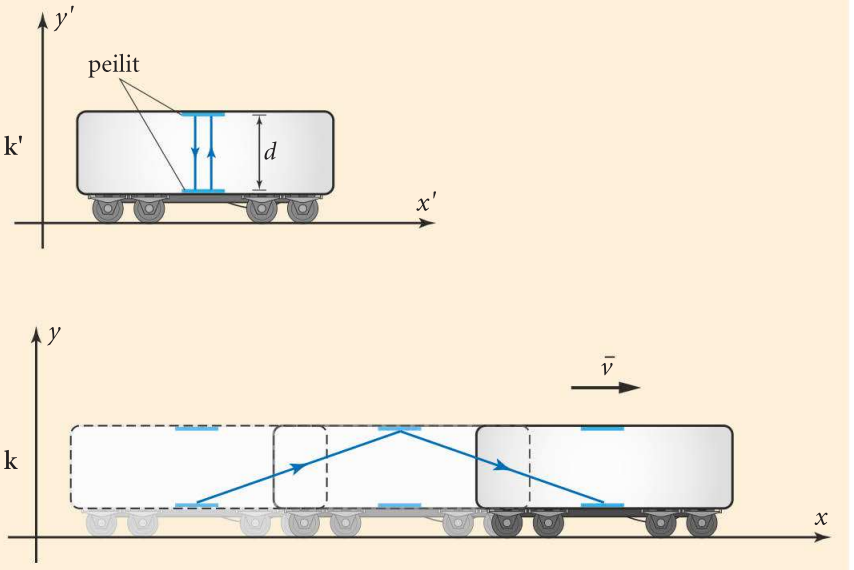
$$\Delta t^2\,\frac{c^2 - v^2}{c^2} = \Delta t_0{}^2$$

$$\Delta t^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \Delta t_0{}^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta t_0{}^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Tämä on edellä esitetty aikadilaation yhtälö.



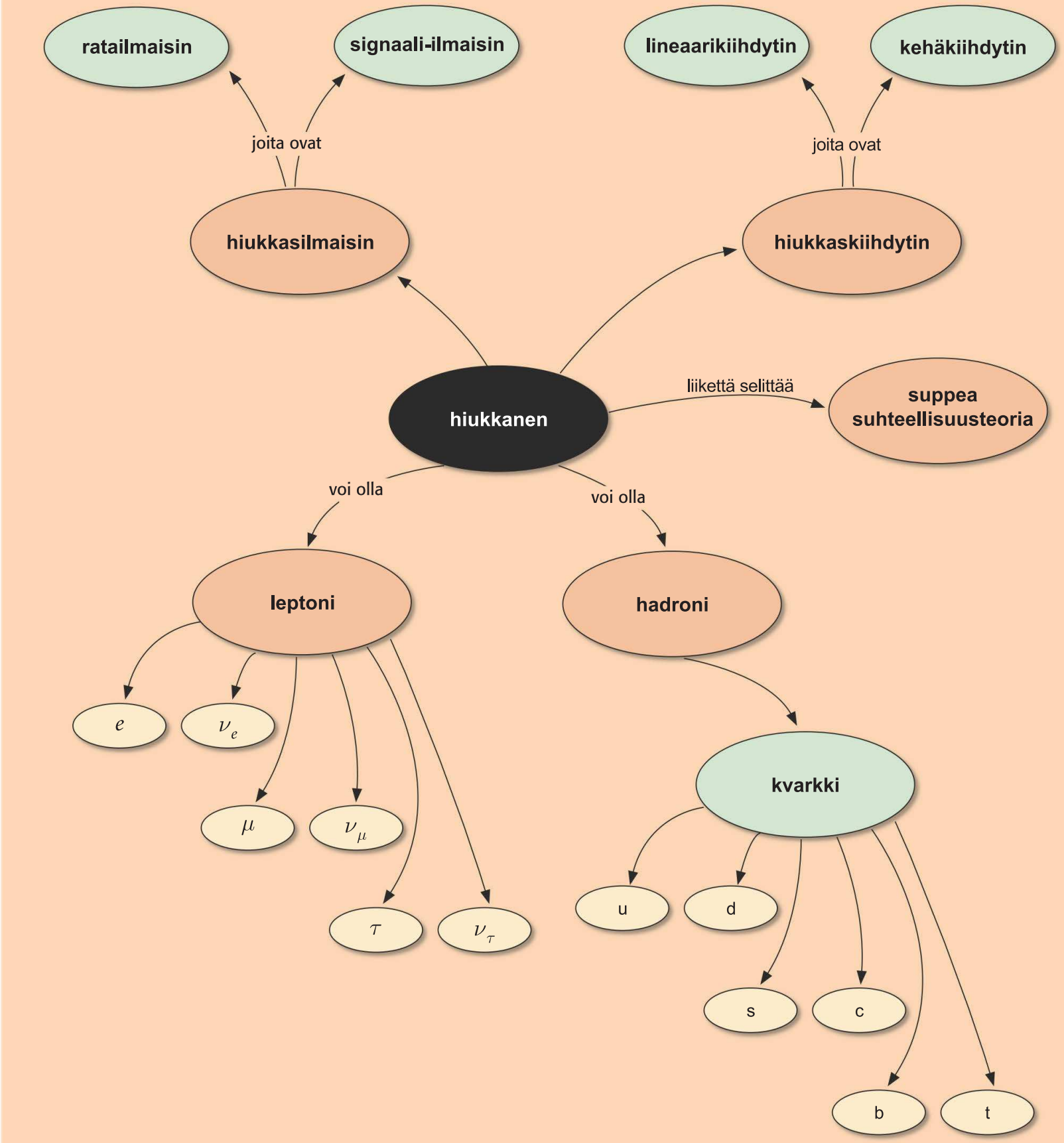
Kun aikadilaation yhtälö tunnetaan, pituuskontraktion yhtälö saadaan suhteellisen helposti. Tarkastellaan tilannetta, jossa juna etenee pitkin suoria raiteita. Junaa sivusta tarkkaileva havaitsija mittaa kahden merkkipaalun väliseksi matkaksi Δx_0 ja junan tähän matkaan käyttämäksi ajaksi Δt, junan kulkema matka voidaan kirjoittaa muodossa $\Delta x_0 = v\Delta t$.

Junassa matkustava havaitsija aloittaa ajanoton, kun hän on ensimmäisen merkkipaalun kohdalla, ja lopettaa, kun hän on jälkimmäisen paalun kohdalla. Tässä koordinaatistossa tapahtumat sattuvat samassa paikassa, joten niiden välinen aika on niiden välinen itseisaika Δt_0. Junan koordinaatistossa paalujen välimatka on siten

$$\Delta x = v\Delta t_0 = v\Delta t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \Delta x_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} ,$$

joka on edellä esitetty pituuskontraktion lauseke.

YHTEENVETO


ratailmaisin
signaali-ilmaisin
lineaarikiihdytin
kehäkiihdytin
joita ovat
joita ovat
hiukkasilmaisin
hiukkaskiihdytin
hiukkanen
liikettä selittää
suppea suhteellisuusteoria
voi olla
voi olla
leptoni
hadroni
e
ν_e
μ
ν_μ
τ
ν_τ
kvarkki
u
d
s
c
b
t

TEHTÄVIÄ

Käsitteet

- leptonit
- kvarkit
- hiukkasen keskielinaika
- perusvuorovaikutukset
- aikadilaatio
- pituuskontraktio

7.1

1. Yhdistä kahdessa sarakkeessa olevat termit toisiinsa.

protoni	leptoni
myoni	kvarkki
positroni	nukleoni
lumo	antihiukkanen

2. Hiukkasreaktioita hallitsevat muutamat säilymislait.

a) Selvitä, mitä säilymislakeja hiukkasreaktioihin liittyy.

b) Miksi reaktio $p \rightarrow n + \nu$ ei voi olla mahdollinen?

3. Etsi seuraavien hiukkasten massat taulukkokirjasta, ja järjestä ne massan mukaan nousevaan järjestykseen: protoni, elektroni, neutroni, fotoni, myoni, pioni, välibosoni Z^0.

4. **a)** Mitä hadronit ovat?

b) Selvitä, mihin kahteen ryhmään hadronit jakautuvat.

c) Selvitä, miten nämä ryhmät eroavat toisistaan.

5. **a)** Luettele perusvuorovaikutukset.

b) Miksi näitä vuorovaikutuksia sanotaan perusvuorovaikutuksiksi?.

c) Selvitä luvun 8 tietojen perusteella, miten perusvuorovaikutus välittyy.

7.2

6. Sivulla 134 olevassa kuvassa on kuplakammion avulla havaittujen hiukkasten ratoja.

a) Miksi useimmat radat ovat kaarevia?

b) Mikä tieto tarvitaan, että voidaan selvittää jäljen jättäneen hiukkasen sähkövaraus?

c) Miksi radat ovat usein spiraalimaisia, jossa radan säde pienenee?

7. Hahmottele kuva hiukkasten radoista magneettikentässä tapahtuvassa parinmuodostuksessa, jossa gammafotoni muuttuu elektroni-positroniparikisi.

8. Joitakin vuosia sitten Eurooppaan suunniteltiin monen kilometrin mittaista lineaarikiihdytintä. Pudasjärvi oli yksi varteenotettava sijoituskohde vakaan peruskallionsa vuoksi.

a) Mitä etuja lineaarikiihdyttimellä on kehäkiihdyttimeen verrattuna?

b) Mitä etuja kehäkiihdyttimellä on lineaarikiihdyttimeen verrattuna?

9. Selvitä Cernin Internet-sivuilta, mitä LEP-kiihdyttimellä on tarkoitus tutkia.

10. Valitse yksi sivun 136 taulukossa mainituista hiukkastutkimuskeskuksista, ja selvitä sen Internet-sivuilta

a) millaisia kiihdyttimiä keskuksessa on

b) mitä tutkimuksia keskuksessa nykyisin tehdään.

7.3

11. Sivuilla 138–139 selitetään, miksi yläilmakehässä syntyviä lyhytikäisiä myoneja havaitaan maanpinnalla. Selityksessä tarkastellaan tilannetta myonien mukana liikkuvassa koordinaatistossa. Selitä ilmiö tarkastelemalla tilannetta Maan koordinaatistossa käyttämällä pituuskontraktiota.

12. Millä nopeudella havaitsijan A on liikuttava levossa olevan tangon suhteen, jotta hänen havaintonsa mukaan tangon pituus on

a) neljäsosa

b) kolme neljäsosaa tangon lepokoordinaatistossa mitatusta pituudesta?

13. Avaruusalus ohittaa Maan nopeudella 250 000 km/s, ja sen kuljettaja havaitsee tapahtuman, jonka kesto Maassa mitattuna on 1,00 s. Kuinka kauan tapahtuma kestää avaruusaluksessa tehdyn mittauksen mukaan?

14. Kuinka monta prosenttia pidemmiksi mitataan lepokoordinaatistossa tapahtuvat aikavälit sellaisessa kordinaatistossa, jonka nopeus lepokoordinaatiston suhteen on 0,10 c?

15. Liikkuvan havaitsijan mittauksissa aikavälit ovat 1,0 % pidempiä kuin lepokoordinaatistossa mitatut aikavälit. Mikä on tällöin liikkuvan havaitsijan nopeus lepokoordinaatiston suhteen?

16. Maan ja Kuun välisellä yhdysjanalla liikkuva havaitsija mittaa Kuun ja Maan väliseksi etäisyydeksi 300 000 km. Mikä on havaitsijan nopeus Maan suhteen?

8 Hiukkasfysiikan ja kosmologian haasteet

© Jukka Maalampi

Hiukkasfysiikka ja kosmologia kuuluvat fysiikan tutkimuksen eturintamaan. Hiukkasfysiikka tutkii ainetta ja sen vuorovaikutuksia pienimmässä mittakaavassa, kosmologia puolestaan suurimmassa mittakaavassa. Tässä luvussa tutustumme hiukkasfysiikan ja kosmologian uusimpiin tutkimustuloksiin ja avoimiin kysymyksiin.

8.1 Hiukkasfysiikan standardimalli

Aineen mikroskooppiset ja makroskooppiset ominaisuudet voidaan selittää neljän perusvuorovaikutuksen avulla. Ne ovat gravitaatiovuorovaikutus, sähkömagneettinen vuorovaikutus, vahva vuorovaikutus ja heikko vuorovaikutus. Vuorovaikutukset ilmenevät perushiukkasten eli kvarkkien ja leptoneiden välisinä voimina, ja ne saavat myös hiukkasia muuttumaan toisiksi esimerkiksi silloin, kun hiukkanen hajoaa.

Hiukkasille ja niiden vuorovaikutuksille kehitettyä matemaattista teoriaa kutsutaan **standardimalliksi**. Sen lähtökohtana ovat hiukkasmaailman ilmiöissä havaitut symmetriat ja säilymislait. Eri vuorovaikutukset, gravitaatiota lukuunottamatta, kuvataan standardimallissa yhtenäisellä tavalla, sillä ne ovat perusluonteeltaan hyvin samankaltaisia, vaikka niiden ilmenemismuodot poikkeavatkin toisistaan. Gravitaation merkitys perushiukkasten ilmiömaailmassa on äärimmäisen vähäinen.

▲ Sudburyssa, Kanadassa toimiva ilmaisin, jolla mitataan Auringosta peräisin olevia neutriinoja. Pallon sisällä on raskasta vettä (D_2O), ja pallon seinämillä olevat ns. valomonistusputket rekisteröivät neutriinojen siinä synnyttämiä heikkoja valonvälähdyksiä.

Välittäjähiukkaset

Viime vuosisadan puolivälissä kehitetty **kvanttisähködynamiikka** on yksi osa standardimallia. Se perustuu kvanttimekaniikkaan ja Einsteinin keksimään sähkömagneettisen kentän kvanttirakenteeseen. Sähkömagneettinen kenttä koostuu fotoneista, ja sähkömagneettisen vuorovaikutuksen voi kuvata tapahtuvan niin, että fotonit välittävät energiaa ja liikemäärää varatulta hiukkaselta toiselle varatulle hiukkaselle. Hiukkanen ikään kuin heittelee ympärilleen fotoneita, ja jos toinen hiukkanen nappaa näitä fotoneita – yksikin riittää – tapahtuu vuorovaikutus. Fotonia kutsutaan sähkömagneettisen vuorovaikutuksen **välittäjähiukkaseksi**.

Myös vahva vuorovaikutus ja heikko vuorovaikutus voidaan kuvata vastaavalla tavalla. Niihinkin liittyy kvanteista muodostunut kenttä, ja kvantit siirtävät energiaa, liikemäärää ja myös muita ominaisuuksia, esimerkiksi sähkövarausta, hiukkaselta toiselle. Heikon ja vahvan vuorovaikutuksen välittäjiä voidaan havaita kokeellisesti. Uskotaan, että gravitaatiovuorovaikutuskin voidaan kuvata vastaavalla tavalla, mutta sen välittäjähiukkasta **gravitonia** ei ole löydetty.

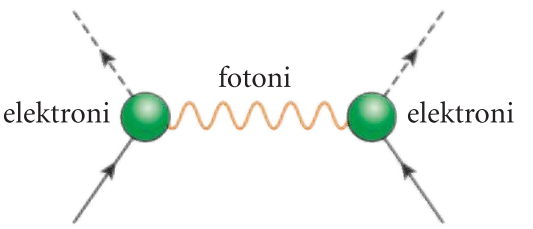
Vuorovaikutuksen voimakkuuksien vertaileminen ei ole yksinkertaista, sillä vuorovaikutukset ovat merkittäviä kovin eri suuruusluokan ilmiöissä. Kaksi atomin ytimessä olevaa protonia vaikuttavat toisiinsa kaikilla neljällä vuorovaikutuksella, ja siinä tilanteessa vuorovaikutuksien suuruudet suhtautuvat toisiinsa oheisen taulukon mukaisesti.

Vuorovaikutus	Välittäjähiukkanen	Suhteellinen voimakkuus
sähkömagneettinen vuorovaikutus	fotoni	1
heikko vuorovaikutus	välibosonit W ja Z	10^{-7}
vahva vuorovaikutus	gluonit (8 kpl)	20
gravitaatiovuorovaikutus	gravitonit (ei havaittu)	10^{-36}

Vuorovaikutuksen kantama

Kvanttimekaniikan mukaan hiukkaset voivat vaihtaa energiaa toistensa kanssa sitä vähemmän, mitä kauempana ne ovat toisistaan. Vuorovaikutus siis heikkenee hiukkasten välisen etäisyyden kasvaessa. Aikaisemmasta muistetaan, että sekä painovoima että sähkömagneettinen voima heikkenevät kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön.

Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjä **fotoni** on massaton, joten sillä on ainoastaan liike-energiaa. Fotonin energia voi siis olla miten pieni tahansa, ja siksi sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kantama on ääretön. Heikon vuorovaikutuksen välittäjillä **välibosoneilla** W ja Z on sitä vastoin suuri massa eli niiden mukana siirtyy aina suuri määrä massan energiaa. Sen takia heikon vuorovaikutuksen kantama on hyvin lyhyt. Vahvan vuorovaikutuksen välittäjät **gluonit** ovat fotonien tapaan massattomia, mutta niiden vaikutus rajoittuu hadronien sisällä olevien kvarkkien välille. Gravitaation välittäjähiukkasen oletetaan myös olevan massaton, sillä painovoiman kantama on ääretön.



▲ **Kahden elektronin välinen sähkömagneettinen vuorovaikutus. Välittäjähiukkanen fotoni siirtää energiaa ja liikemäärää elektronien välillä. Muut vuorovaikutukset tapahtuvat vastaavalla tavalla.**

Sähkömagneettinen vuorovaikutus

Sähkömagneettinen vuorovaikutus on ihmisen mittakaavan ja kokemusmaailman ilmiöiden vallitseva vuorovaikutus. Atomien väliset voimat määräävät aineen rakenteen ja ominaisuudet. Kaikki kemialliset ilmiöt, myös esimerkiksi aistiemme toiminta, ilmentävät atomien ja molekyylien sähkömagneettisia vuorovaikutuksia. Myös sellaisissa mekaniikan ilmiössä kuin tukivoimissa ja kitkassa on viime kädessä kyse aineen mikrotasolla vaikuttavista sähkömagneettisista voimista.

Sähköinen vuorovaikutus voi tapahtua sellaisten kappaleiden tai hiukkasten välillä, joilla on sähkövaraus. Sähkövaraus voi olla joko positiivinen tai negatiivinen, ja suuruudeltaan se on alkeisvarauksen e monikerta. Kvarkeilla on

murtolukuvaraus, mutta ne yhdistyvät hiukkasiksi, joilla on kokonaislukuvaraus. Jos hiukkasilla on samanmerkkinen sähkövaraus, niiden välinen sähköinen voima on poistovoima. Erimerkkisesti varautuneiden hiukkasten välillä vallitsee vetovoima.

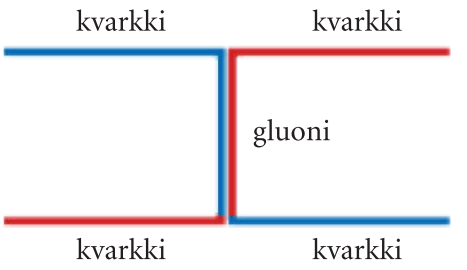
Sähköisten ja magneettisten ilmiöiden välinen yhteys selvisi fyysikoille 1800-luvulla, jolloin syntyi sähkömagnetismin teoria. Sen kokeellisen perustan loi Michael Faraday, ja James Clerk Maxwell saattoi sen matemaattiseen muotoon. Maxwellin teoria on yksi fysiikan vakuuttavimmista teorioista. Kvanttisähködynamiikka on sen kvanttimekaaninen yleistys.

Vahva vuorovaikutus

Vahva vuorovaikutus vallitsee kvarkkien välillä. Kvarkeilla on sähkövarauksen lisäksi myös vahvaan vuorovaikutukseen liittyvä varaus, jota kutsutaan **värivaraukseksi** tai väriksi. Värivarauksella ei ole mitään tekemistä silmillä havaittavien värien kanssa, se on vain symbolinimi hiukkasen ominaisuudelle tuntea vahvan voiman vaikutus. Kvarkkien välisen vuorovaikutuksen välittäjiä kutsutaan nimellä **gluoni**. Nimi viittaa siihen, että vahva voima ikään kuin liimaa (eng. *glue*) kvarkit yhteen.

Kvarkin värivarauksella on kolme mahdollista arvoa: **punainen**, **sininen** ja **vihreä**. Antikvarkin värivaraukset ovat näiden vastavärejä eli **antivärejä**. Sähkövarauksia voi laskea yhteen kuin lukuja, mutta värivarausten yhteenlaskeminen on hieman mutkikkaampaa. Jos punainen, sininen ja vihreä kvarkki yhdistetään, saadaan hadroni, jolla ei ole värivarausta. Samoin käy, jos yhdistetään kvarkki ja antikvarkki, joiden värit ovat toistensa vastavärejä. Hadronit ovat siis värittömiä, joten ne eivät tunne vahvan voiman vaikutusta. Hiukkasia, joilla on värivaraus, ei voi esiintyä luonnossa vapaana, sillä vahva voima sitoo ne aina yhteen toisten värillisten hiukkasten kanssa. Lähellä toisiaan olevien nukleonien (protonien ja neutronien) kvarkit tosin vuorovaikuttavat hiukan keskenään, joka aiheuttaa ytimessä protoneita ja neutroneita yhteen sitovan ydinvoiman, eräänlaisen vahvan voiman jäännösvoiman.

Myös gluoneilla on väri. Gluoneja on kahdeksaa eri lajia, jotka poikkeavat toisistaan värivaraukseltaan. Niiden värit muodostuvat erilaisista värien ja vastavärien yhdistelmistä. Värillisyytensä takia gluonit tuntevat välittämänsä voiman vaikutuksen myös itse. Samaan tapaan kuin varatut hiukkaset säteilevät ympärilleen fotoneja, gluonit säteilevät ympärilleen gluoneja. Kun kaksi gluonia kohtaa, ne voivat vuorovaikuttaa toistensa kanssa ympärilleen säteilemiensä gluonien välityksellä. Fotoneilla ei ole sähkövarausta, joten ne eivät voi vuorovaikuttaa keskenään vastaavalla tavalla.



▲ **Väri on vahvaan vuorovaikutukseen liittyvä varaus. Kvarkit ovat sinisiä, punaisia tai vihreitä, gluonin väri taas on kahden värin yhdistelmä. Gluoni siirtää värivarauksia kvarkkien välillä.**

Heikko vuorovaikutus

Kaikilla kvarkeilla ja leptoneilla on heikkoja vuorovaikutuksia. Niillä on siis heikkoon vuorovaikutukseen liittyvä varaus. Heikon vuorovaikutuksen välittäjinä toimivat W- ja Z-hiukkaset, joita kutsutaan välibosoneiksi. W-hiukkasella on joko positiivinen tai negatiivinen sähkövaraus, Z-hiukkanen on neutraali. Heikko vuorovaikutus tapahtuu niin, että kvarkki tai leptoni lähettää välibosonin, jonka toinen kvarkki tai leptoni ottaa vastaan tai välibosoni hajoaa kvarkeiksi tai leptoneiksi. Välibosonin W tapauksessa lähettävä hiukkanen muuttuu samalla toiseksi hiukkaseksi, koska W vie mukanaan sähkövarausta ja sähkövarauksen kokonaismäärä ei voi muuttua.

Yksi esimerkki heikosta vuorovaikutuksesta on myonin hajoaminen. Myoni on elektronin kaltainen hiukkanen, jonka massa on noin kaksisataakertainen elektronin massaan verrattuna. Se on epästabiili hiukkanen ja elää keski-

määrin 900 s ennen hajoamistaan elektroniksi, neutriinoksi ja antineutriinoksi:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu .$$

Heikko vuorovaikutus peittyy usein muiden vuorovaikutusten alle, sillä hiukkaset kokevat sen harvemmin kuin sähkömagneettisen ja vahvan vuorovaikutuksen. Heikon vuorovaikutuksen lyhyen kantaman takia hiukkasten pitää tulla lähelle toisiaan, jotta heikko vuorovaikutus tapahtuisi. Neutriinoille heikko vuorovaikutus on ainoa vuorovaikutustapa, ja sen takia neutriinot reagoivat muun aineen kanssa hyvin vähän. Esimerkiksi Auringosta peräisin olevat neutriinot voivat helposti lentää maapallon läpi.

Yleisin heikkoon vuorovaikutukseen perustuva luonnonilmiö on beetaradioaktiivisuus. Beetahajoamisessa atomin ytimessä yksi ytimen neutroneista muuttuu protoniksi ja lähettää samalla W^- -välibosonin. Välibosoni hajoaa nopeasti elektroniksi ja antineutriinoksi. Hajoamisissa syntyvät elektronit havaitaan beetasäteilynä.

Heikko vuorovaikutus voi tuntua merkityksettömältä, mutta ilman sitä vety ei voisi fuusioitua heliumiksi eivätkä tähdet voisi loistaa. Tähdissä tapahtuvissa fuusioreaktioissa neljän vety-ytimen protoneista syntyy ydinreaktioiden kautta heliumydin, jossa on kaksi protonia ja kaksi neutronia. Heikko vuorovaikutus muuttaa näissä reaktioissa puolet protoneista neutroneiksi, ja samalla vapautuu energiaa. Auringossa tällä tavalla syntyvä energia on välttämätön elämälle maapallolla.

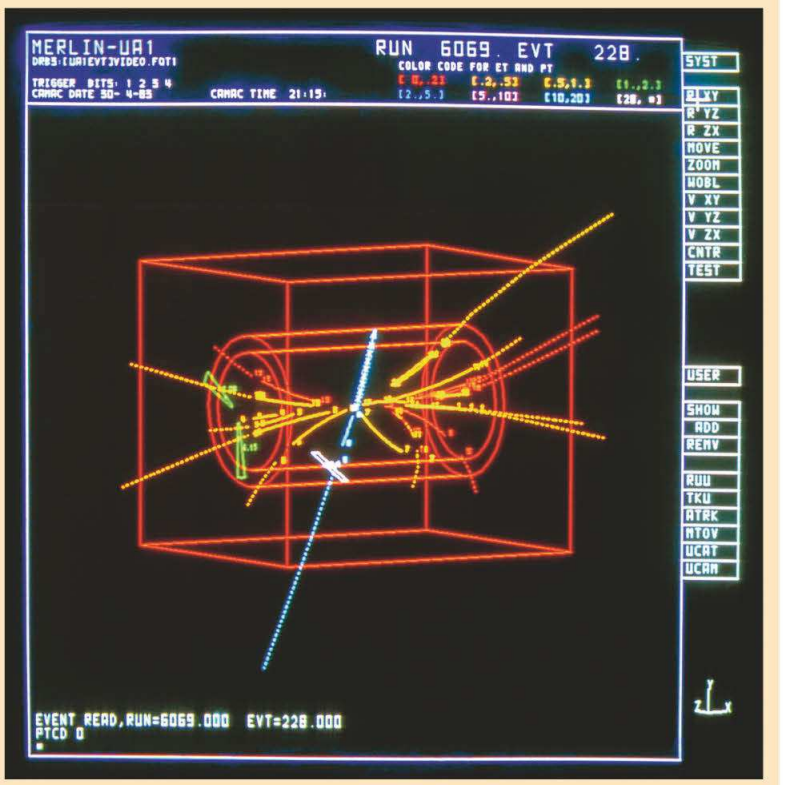
Heikon voiman kvanttien W ja Z löytäminen — EXTRA

Heikon voiman välittäjät W ja Z löydettiin kokeellisesti CERN:ssä 1980-luvun alussa. Renkaan muotoiseen SPS (*super proton synchrotron*) -protonikiihdyttimeen tehtiin muutoksia niin, että siinä voitiin samanaikaisesti kiihdyttää antiprotoneita vastakkaiseen suuntaan. Välibosoneita W ja Z syntyi, kun protoneissa ja antiprotoneissa olevat kvarkit ja antikvarkit törmäsivät toisiinsa. Välibosonit havaittiin niiden hajoamisessa syntyvien suurienergiaisten elektronien ja neutriinojen avulla:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

$$Z \rightarrow e^+ + e^- \text{ tai } \mu^+ + \mu^- .$$

Protonien ja antiprotonien törmäyksessä syntyneiden hiukkasten ilmaisimiin jättämät jäljet tallennettiin digitaalisesti, ja niistä muodostettiin kuva tietokoneen ruudulle.



▶ Välibosonin W havaitseminen. Välibosoni on hajonnut pian synnyttyään elektroniksi ja antineutriinoksi. Alas vasemmalle suuntautuva sininen viiva kertoo elektronin liikeradan. Antineutriino ei jättänyt ilmaisimiin jälkiä, mutta sen rata, joka on ylöspäin suuntautuva sininen viiva, voitiin laskea energian ja liikemäärän säilymisen perusteella muiden hiukkasten radoista.

8.2 Hiukkasfysiikan avoimia kysymyksiä

Massan arvoitus

Tutkijat kehittivät 1960-luvulla matemaattisen mallin, joka kuvaa samalla kertaa sekä sähkömagneettisia että heikkoja vuorovaikutuksia. Tätä mallia kutsutaan sähköheikkoteoriaksi. Yksi sen ennustuksista oli neutraalin välibosonin Z olemassaolo. Ennen sähköheikkoteorian keksimistä uskottiin, että kaikki heikon vuorovaikutuksen ilmiöt voidaan selittää W-hiukkasen avulla.

Hiukkasten massat selitetään sähköheikkoteoriassa ns. **Higgsin kentän** avulla. Avaruudessa oletetaan olevan kenttä, joka vaikuttaa hiukkasiin ja ilmenee niiden massana. Yleensä hiukkasiin ja voimiin liittyvät kentät häviävät tyhjässä avaruudessa, koska se on energian kannalta edullisin vaihtoehto. Higgsin kentän kohdalla asian oletetaan olevan toisin: tyhjiön energia on pienimmillään silloin, kun Higgsin kentällä on tietty nollasta poikkeava arvo. Higgsin kenttä selittäisi, paitsi kvarkkien ja leptonien massat, myös heikon voiman kvanttien W- ja Z-bosonien massat.

Higgsin kentän kvanttia kutsutaan **Higgsin hiukkaseksi**. Sen massan oletetaan olevan 100–200 GeV/c^2 eli yli satakertainen protonin massaan (m_p=0,938 GeV/c^2) verrattuna. Higgsin kenttä selittäisi tämänkin massan. Higgsin hiukkanen on sähkövaraukseton hiukkanen. Sen olemassaoloa ei ole vielä varmistettu kokeellisesti. CERN:n LHC (*Large Hadron Collider*) -kiihdyttimen tärkein tavoite on tuottaa Higgsin hiukkanen ja tutkia sen ominaisuuksia. Massan alkuperä on ainakin siihen asti avoin kysymys.

Higgsin hiukkasen löytyminen ei vielä ratkaisisi massan ongelmaa kokonaan. Vielä olisi pystyttävä selittämään, miksi hiukkasten massat poikkeavat niin paljon toisistaan. Raskaimman perushiukkasen top-kvarkin massa on noin 172 GeV/c^2, kun esimerkiksi elektronin massa on vain 0,511 MeV/c^2, ja neutriinojen massat ovat korkeintaan tuhannesosa elektronin massasta. Erilaisten massojen ymmärtäminen tulee vaatimaan vielä paljon kokeellisia tutkimuksia ja teoreettisia oivalluksia.

	kvarkit		leptonit	
e-perhe	u	d	e	ν_e
μ-perhe	c	s	μ	ν_μ
τ-perhe	t	b	τ	ν_τ

▲ **Perushiukkaset muodostavat kolme perhettä (elektronin, myonin ja taun perheet), joissa kussakin on kaksi kvarkkia, elektronin kaltainen leptoni ja neutriino. Eri perheiden vastinhiukkaset, jotka ovat taulukossa allekkain, eroavat toisistaan vain massaltaan.**

Supersymmetria

Hiukkasilla ja voimakenttien kvanteilla on spiniksi kutsuttu ominaisuus. Spinin suuruutta kuvaa spin-kvanttiluku (s = 0, 1/2, 1, …), joka selittää niiden tiettyjä käyttäytymisen piirteitä. Standardimallin mukaan aineen perushiukkaset leptonit ja kvarkit ovat spin-1/2-hiukkasia eli **fermioneja**. Voimien kvantit fotoni, W- ja Z-hiukkanen ja gluonit ovat puolestaan spin-1-hiukkasia eli **vektoribosoneita**, ja Higgsin hiukkanen on spin-0-hiukkanen eli **skalaaribosoni**.

Nykyisin uskotaan, että luonto on symmetrisempi kuin tämä malli sanoo. Fermionilajeja ja bosonilajeja uskotaan olevan luonnossa sama määrä. Fermionien ja bosonien välistä symmetriaa kutsutaan **supersymmetriaksi**.

Supersymmetrian mukaan on olemassa esimerkiksi elektronin kaltainen spin-0-bosoni, joka on muutoin elektronin kaltainen, mutta sen spin on puoli yksikköä pienempi kuin elektronin spin. Tätä spin-0-bosonia kutsutaan **selektroniksi**. Samoin on olemassa fotonin kaltainen hiukkanen, **fotiino**, jonka spin on puoli yksikköä pienempi kuin fotonin spin eli 1/2. Kaikilla muillakin kvarkeilla, leptoneilla ja vuo-

rovaikutusten kvanteilla, samoin kuin Higgsin hiukkasella, oletetaan olevan supersymmetrian mukainen vastinhiukkanen.

Jos luonto noudattaisi supersymmetriaa, hiukkasella ja sen supersymmetrisellä vastineella, esimerkiksi elektronilla ja selektronilla, tulisi olla sama massa. Tällaisia samanmassaisia hiukkaspareja ei kuitenkaan ole löydetty, joten supersymmetria ei ole luonnossa voimassa ainakaan täydellisenä. Supersymmetrian ennustamien uusien hiukkasten massojen oletetaan olevan 100–1000 GeV/c^2, eikä niitä ole siten voitu vielä tuottaa hiukkaskiihdyttimillä. Uusilla kiihdyttimillä, kuten LHC:llä, niitä uskotaan kuitenkin voitavan havaita. Epätäydellisenäkin supersymmetria on hyödyllinen periaate vuorovaikutusten yhtenäisteorian rakentamisessa.

Supersymmetrisen mallin hiukkaset

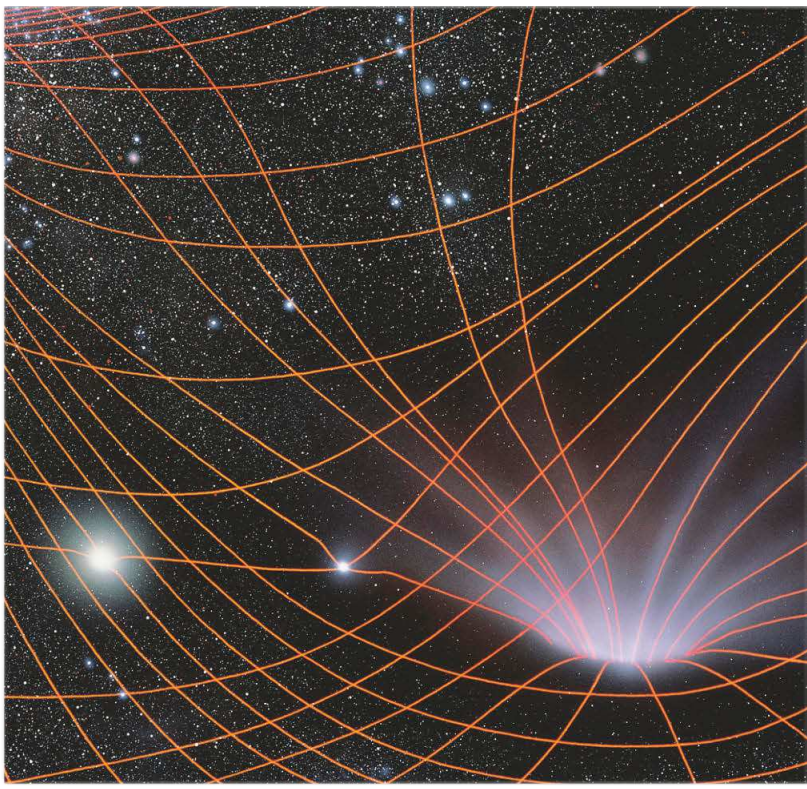
$s = 0$	$s = 1/2$	$s = 1$
skalaaribosoni	fermioni	vektoribosoni
sleptonit	leptonit	
skvarkit	kvarkit	
Higgsin bosoni	**higgsiino**	
	fotiino	fotoni
	wiino	W
	ziino	Z
	gluiinot	gluonit

Supersymmetriset vastinhiukkaset on lihavoitu.

Gravitaatio

Aiemmin on tarkasteltu gravitaatiota Newtonin painovoimateorian avulla. Siinä painovoima kuvataan etävoimana, jonka suuruuden määräävät kappaleiden massat ja kappaleiden välinen etäisyys. Vuonna 1916 Albert Einstein esitti uuden teorian, joka vastaa paremmin maailmankaikkeudessa havaittuja gravitaatioilmiöitä. Se tunnetaan nimellä **yleinen suhteellisuusteoria**. Useimmissa tilanteissa tullaan hyvin toimeen Newtonin gravitaatioteorialla, mutta silloin kun painovoimakenttä on suuri, tarvitaan yleistä suhteellisuusteoriaa.

Yleisen suhteellisuusteorian mukaan gravitaatio on avaruuden ja ajan rakenteen vaikutusta liikkeeseen. Painavat kappaleet, esimerkiksi tähdet, kaareuttavat ympäröivää avaruutta eli muuttavat siellä vallitsevia geometrian sääntöjä.

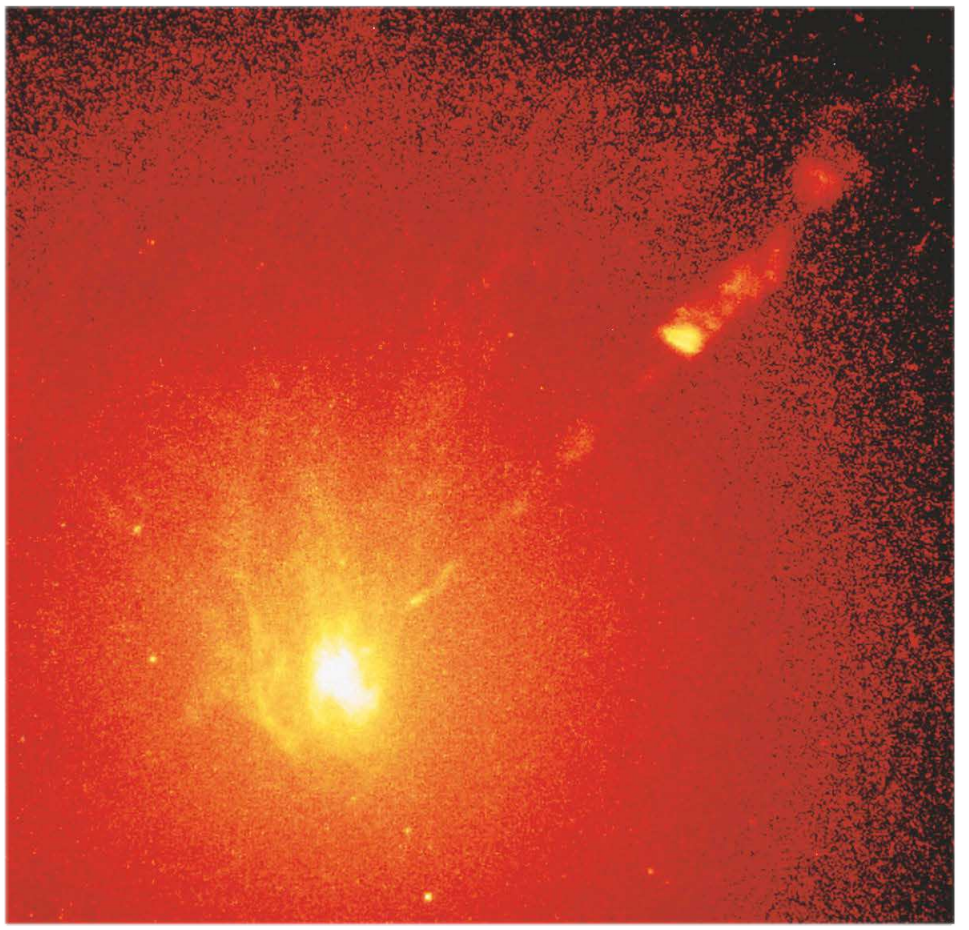


▲ Painava taivaankappale kaareuttaa avaruutta. Viivat esittävät vapaasti liikkuvan kappaleen ratoja.

Planeetat kiertävät Aurinkoa ellipsiratoja pitkin, koska kaareutuneessa avaruudessa ne ovat niitä reittejä, joita ne liikkeen jatkavuuden lain mukaan liikkuvat, kun niihin ei vaikuta mikään voima. Myös aika muuttuu. Aika kuluu hitaammin lähellä massallista kappaletta kuin kauempana siitä.

Yleisen suhteellisuusteorian mukaan gravitaatio vaikuttaa massan lisäksi myös energiaan. Energia toisaalta vaikuttaa massan tavoin avaruuden kaareutumiseen. Ensimmäinen havaintotodiste yleisestä suhteellisuuteoriasta saatiin vuonna 1919, kun Auringon nähtiin taittavan tähdestä tulevaa valoa, siis vaikuttavan massattomien fotonien liikerataan.

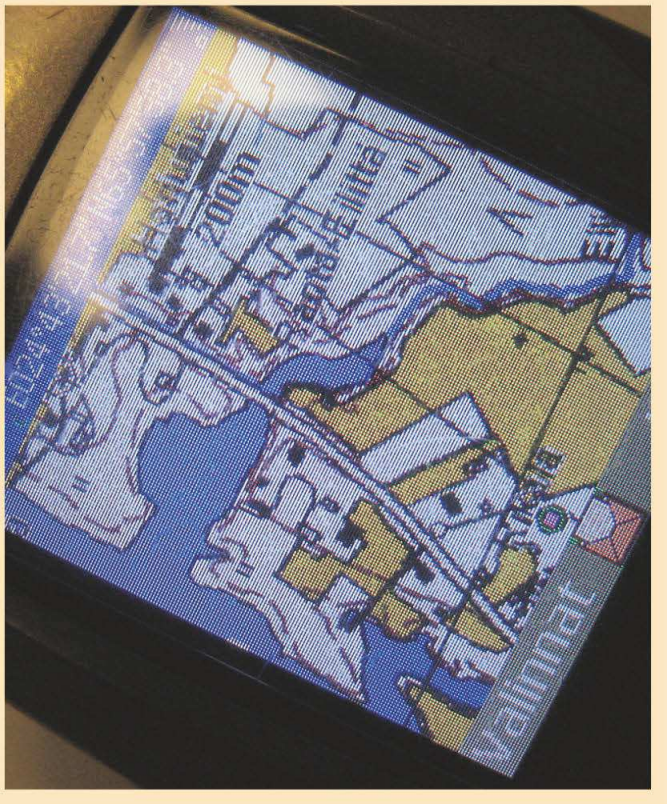
Kun energiaa tuottavat fuusioreaktiot loppuvat suuren tähden keskustassa, tähti luhistuu gravitaation vaikutuksesta. Silloin voi syntyä **musta aukko**. Mustan aukon ympärillä avaruus on kaareutunut niin voimakkaasti, ettei mikään tieto pääse edes sähkömagneettisen säteilyn muodossa sen sisältä ulkopuoliseen maailmaan.



◀ **Galaksin M87 keskellä on musta aukko. Aukkoa kohti kieppuva aine on hyvin kuumaa, ja siksi mustan aukon ympäristö näyttää kirkkaalta. Kymmenien valovuosien pituinen ohut valokiila on peräisin mustan aukon magneettikentässä suunnattoman nopeasti kiertävistä elektroneista.**

GPS-PAIKANNUS EI TOIMI ILMAN SUHTEELLISUUSTEORIAA EXTRA

GPS perustuu satelliiteissa oleviin tarkkoihin atomikelloihin, jotka lähettävät aikamerkkejä Maassa oleviin GPS-laitteisiin. Signaalit etenevät valonnopeudella, ja GPS-laite laskee eri satelliiteista tulevien aikamerkkien saapumisaikoja vertaamalla, kuinka kaukana olemme kustakin satelliitista ja saa määritettyä olinpaikkamme leveys- ja pituuspiirin sekä korkeuden merenpinnasta muutaman kymmenen metrin tarkkuudella. Sekä Einsteinin ennustama ajan dilaatio että gravitaation vaikutus ajan kulkuun on otettava tässä vertailussa huomioon. Dilaation takia satelliittien kellot käyvät maanpinnalla olevia kelloja hitaammin, koska yleisen suhteellisuusteorian mukaan aika toisaalta juoksee nopeammin avaruudessa kuin maanpinnalla, sillä Maan aiheuttama gravitaatio on siellä pienempi. Kaiken kaikkiaan satelliittien kellot edistävät maanpinnalla oleviin kelloihin verrattuna muutama kymmenen miljoonasosa sekuntia vuorokaudessa.



▲ **GPS-laiteet ovat nykyään yleisiä (GPS, *Global Positioning System*). Niiden toiminnassa otetaan huomioon suhteellisuusteoria.**

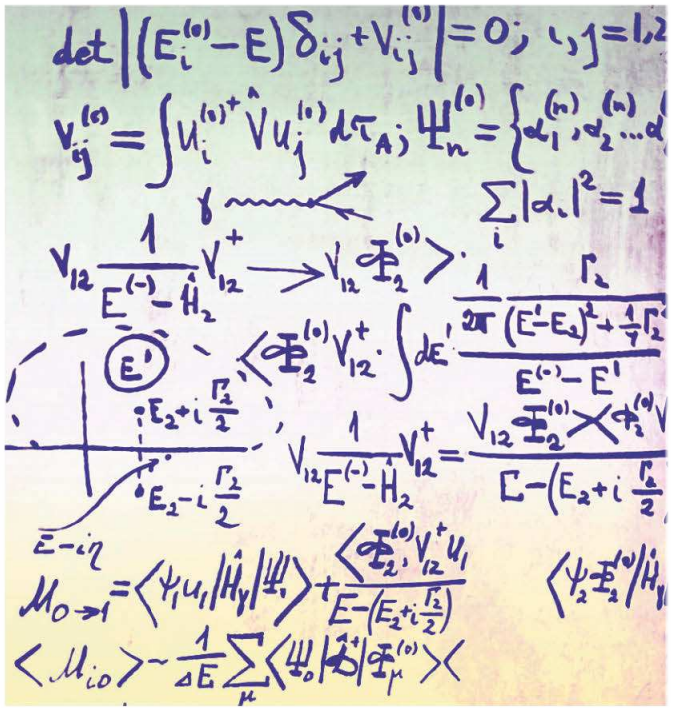
Supersäikeet

Yleinen suhteellisuusteoria ei selitä kaikkia luonnon gravitaatioilmiöitä. Gravitaatiolle pitää kehittää kvanttiteoria, kuten muille vuorovaikutuksille on jo tehty. Sitä tarvitaan esimerkiksi maailmankaikkeuden aivan alun ja mustan aukon tarkempaan kuvailuun. Kun hiukkaset ovat pakkautuneet hyvin lähelle toisiaan, gravitaation vaikutuksen oletetaan olevan yhtä merkittävä kuin muidenkin vuorovaikutuksien.

Tutkijat ovat saaneet huomata gravitaation kvanttiteorian kehittämisen visaiseksi ongelmaksi. Uusin yritys ratkaista tämä ongelma on **supersäieteoria**, jonka kehittely aloitettiin 1980-luvulla. Supersäieteoriassa aineen perusrakenneosasiksi oletetaan pienet säikeet tai säielenkit. Nämä värähtelevät samaan tapaan kuin kitaran kielet. Niiden eri värähtelymuodot– erikorkuiset ”sävelet” – vastaavat tuntemiamme eri hiukkaslajeja (elektroneja, eri kvarkkeja jne). Etuliite super viittaa siihen, että teoria noudattaa supersymmetriaa.

Supersäieteoria on varsin mutkikas rakennelma, ja sen kehittäminen on vaatinut monia matemaattisia keksintöjä. Yksi säieteorioiden erikoinen piirre on, että säikeet elävät kymmenulotteisessa avaruudessa. Tuttujen ajan ja kolmen paikkaulottuvuuden lisäksi olisi olemassa kuusi ylimääräistä paikkaulottuvuutta. Ne voisivat olla käpertyneitä niin pieniksi, että emme näe niitä tai vaihtoehtoisesti sähkömagneettinen säteily ei voi kulkea ylimääräisissä ulottuvuuksissa, jolloin tieto näistä ulottuvuuksista ei olisi voinut tulla havaintolaitteisiimme. Supersäieteoria ei ole vielä saanut lopullista muotoaan, eikä sitä ole vielä voitu testata kokeiden avulla.

Matematiikka on fysiikan kieli.

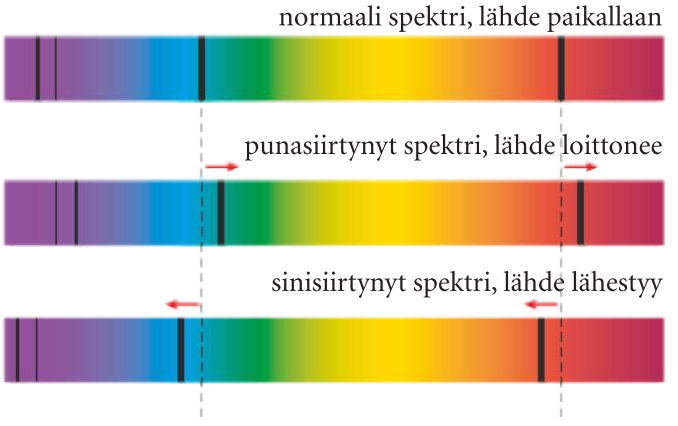


▲ **Standardimalli ja muut nykyaikaiset hiukkasfysiikan teoriat perustuvat yksityiskohtaisiin matemaattisiin päätelmiin. Teorioiden paikkansapitävyyden ratkaisevat kuitenkin kokeellisissa mittauksissa saatavat tulokset.**

8.3 Kosmologia tutkii maailmankaikkeutta

Koko maailmankaikkeuden rakenteen ja kehityshistorian tutkimusta kutsutaan kosmologiaksi. Kosmologi saa tietoa maailmankaikkeudesta eli universumista tähtitieteellisten havaintojen avulla. Koska tämä tieto siirtyy kohteesta teleskooppeihin ja muihin havaintolaitteisiin korkeintaan valonnopeudella, kaukaisia kohteita tarkastelemalla nähdään samalla kauaksi menneisyyteen, jopa miljardien vuosien taakse.

Maailmankaikkeuden rakenteen ja historian ymmärtäminen perustuu havaintotiedon ohella hiukkasfysiikkaan ja yleiseen suhteellisuusteoriaan. Viime aikoina mittausmenetelmät ja mittalaitteet ovat kehittyneet ja tarkentuneet huomattavasti, ja kosmologiasta on tullut muuhun fysiikkaan verrattavaa tarkkuustiedettä. Monet suuret kysymykset odottavat kuitenkin vielä vastausta.



▲ Ylemmässä kuvassa on havaitsijaan nähden paikallaan olevan valolähteen spektri, jossa näkyvät tummina vedyn absorptioviivat. Keskimmäisessä kuvassa on loittonevan galaksin vastaava spektri. Dopplerin ilmiön takia vedyn absorptioviivat ovat siirtyneet kohti pitempiä aallonpituuksia eli punaiseen valoon päin. Alimpana on lähestyvän galaksin lähettämä spektri, jossa spektriviivat ovat siirtyneet siniseen valoon päin.

Maailmankaikkeuden laajeneminen

Tähdet lähettävät sähkömagneettista säteilyä kaikilla aallonpituuksilla. Tähden uloimpien kaasukerrosten atomit absorboivat osan tästä säteilystä virittymällä korkeampiin viritystiloihin. Tämä näkyy tähden spektrissä tummina absorptioviivoina, joista kaasukehän alkuaineet voidaan tunnistaa.

Kun 1910-luvulla alettiin mitata tähtisumujen spektrejä, huomattiin niiden spektriviivojen siirtyneen pitempiä aallonpituuksia kohti, eli niissä oli tapahtunut **punasiirtymä**. Tämä osoitti, että sumut loittonevat meistä. Loittonevan sumun lähettämän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus kasvaa Dopplerin ilmiön takia.

Seuraavalla vuosikymmenellä yhdysvaltalainen tähtitieteilijä Edwin Hubble osoitti, että tähtisumut ovat kaukana Linnunradan ulkopuolella olevia toisia galakseja. Hän teki myös toisen mielenkiintoisen havainnon: punasiirtymä, ja siten myös loittonemisnopeus, ovat sitä suurempia, mitä kauempana galaksi sijaitsee. Jos l on galaksin etäisyys meistä ja v sen loittonemisnopeus, niin pätee Hubblen laki

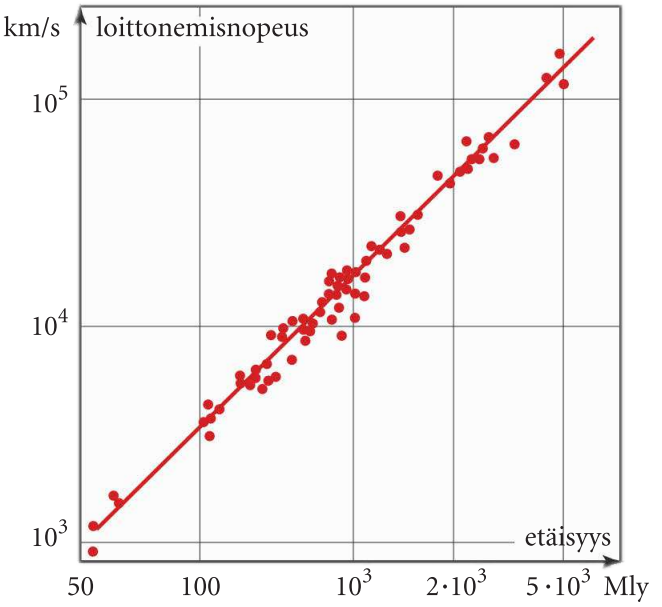
$$v = H_0 l.$$

H_0 on Hubblen vakio. Sen arvo on nykyisten mittausten mukaan

$$H_0 = 22 \frac{\text{km/s}}{\text{Mly}}.$$

Mittauksen epätarkkuus on noin 5 % molempiin suuntiin. Nimittäjässä on käytetty etäisyyden yksikkönä valovuotta (ly, *light year*), joka on se matka, jonka valo kulkee yhden vuoden aikana tyhjiössä ($1\ \text{ly} = 9{,}46 \cdot 10^{12}\ \text{km}$). Hubblen lain mukaan yhden miljoonan valovuoden (1 Mly) lisäys etäisyyteen vastaa loittonemisnopeuden kasvamista 22 km/s.

Hubblen laki



▲ **Eräiden galaksien loittonemisnopeudet suhteessa galaksien etäisyyteen.**

Galaksien loittoneminen on osoitus **maailmankaikkeuden laajenemisesta**. Kaikkialle avaruuteen syntyy koko ajan lisää tilaa. Tämä etäännyttää galakseja toisistaan sitä enemmän, mitä suurempi niiden välimatka on.

Näkyvä maailmankaikkeus eli se osa avaruutta, josta olemme sähkömagneettisen säteilyn muodossa ehtineet saada tietoa, aloitti laajenemisensa 13,7 miljardia vuotta sitten hyvin pienestä alkumaailmankaikkeudesta. Tätä teoriaa maailmankaikkeuden synnystä kutsutaan **alkuräjähdysteoriaksi** eli **Big Bang** -teoriaksi. Alkuräjähdys ei tapahtunut missään erityisessä paikassa (”räjähdyspisteessä”) vaan kaikkialla, jokaisessa avaruuden pisteessä yhtä aikaa. Tätä voi havainnollistaa kuvittelemalla maailmankaikkeus täplikkään ilmapallon pinnaksi. Kun ilmapalloon puhalletaan lisää ilmaa, pallon pinta – ”maailmankaikkeus” – laajenee ja täplät – ”galaksit” – loittonevat toisistaan joka puolella pintaa samalla tavalla.

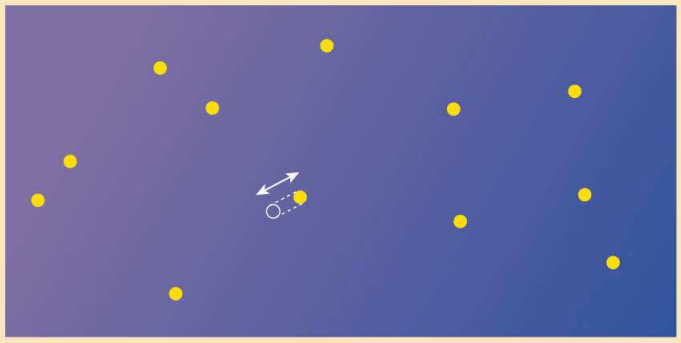
▲ **Jos ilmapallon pinta kuvaa maailmankaikkeutta, sen laajeneminen saa galaksit etäämmälle toisistaan. Jokaisen pisteen pallon pinnalla voi ajatella olevan laajenemisen keskus.**

Tähtitieteellisten etäisyyksien määrittäminen

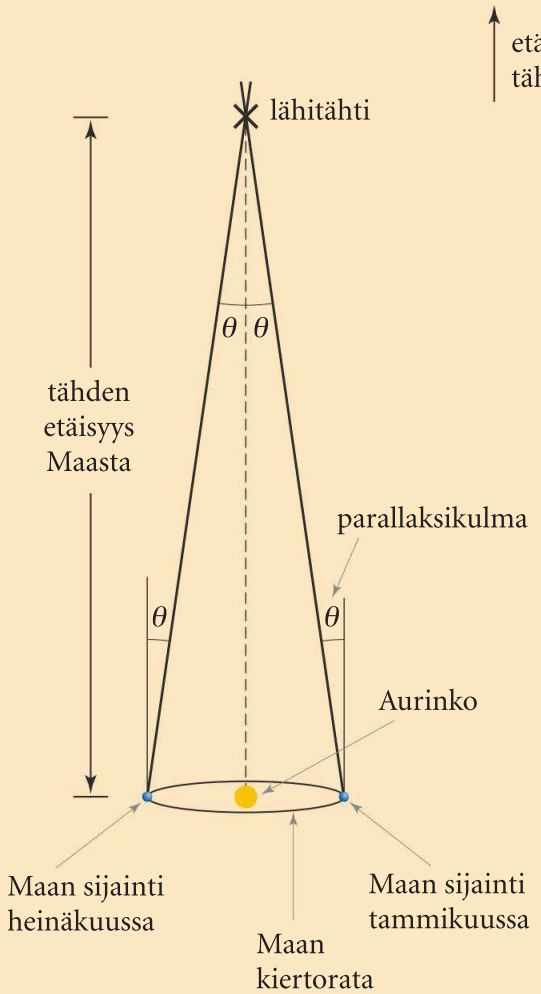
Kaukaisten tähtitaivaan kohteiden etäisyydet saadaan selville moniaskelmaisella menetelmällä, ”tikapuilla”.

1. Verrataan Maan kiertoliikkeestä Auringon ympäri johtuvaa tähden näennäistä liikettä taivaalla (parallaksia) Maan kiertoradan säteeseen. Tällä parallaksimenetelmällä eli kolmiomittauksella voidaan määrittää alle 60 ly:n etäisyydellä olevien tähtien etäisyydet.

2. Auringon tapaisten vakaassa kehitysvaiheessa olevien tähtien väri kertoo niiden lähettämän valon määrän (absoluuttisen kirkkauden). Vertaamalla samanvärisiten tähtien Maassa mitattuja kirkkauksia (näennäisiä kirkkauksia) saadaan selville niiden suhteelliset etäisyydet. Tällä menetelmällä päästään noin 30 kly:n etäisyydelle.



▲ **Maan kiertoliikkeestä johtuva tähden paikan näennäinen muuttuminen taivaalla.**

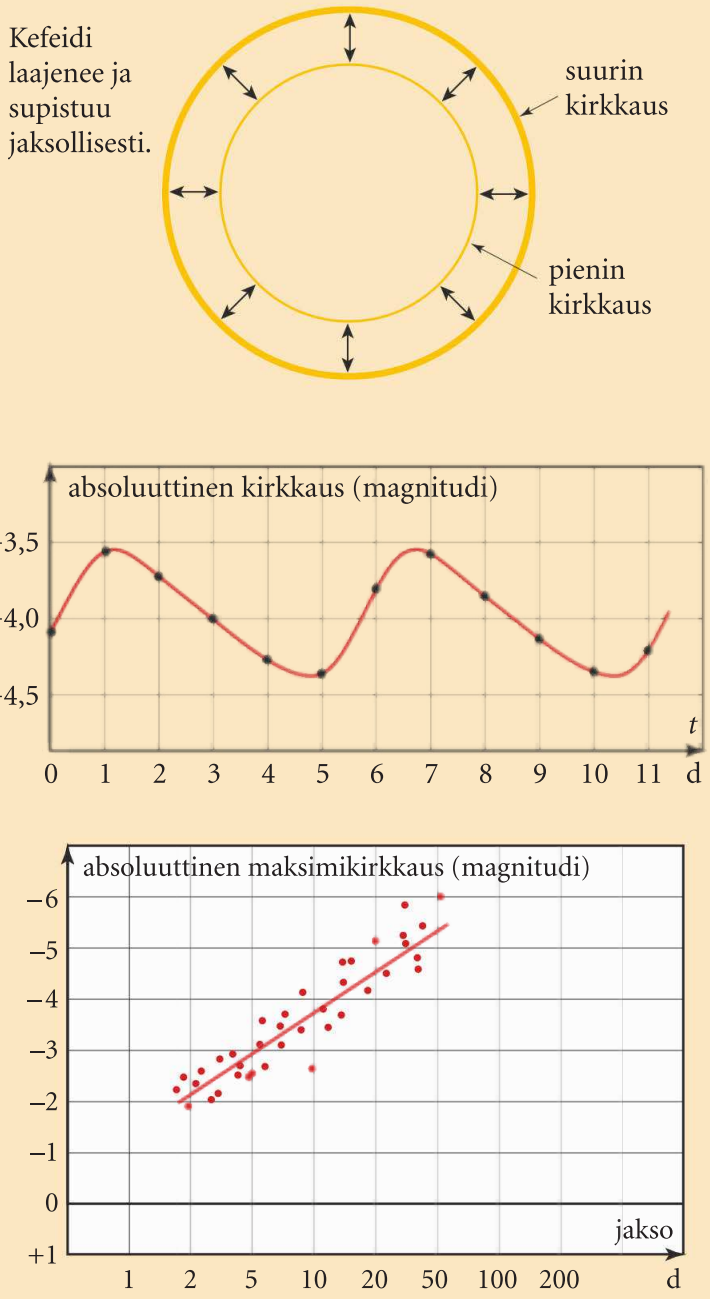


▶ **Lähitähtien etäisyys voidaan määrittää mittaamalla parallaksikulma θ ja Maan kiertoradan halkaisija.**

3. Amerikkalainen Henrietta Leavitt keksi 1912 sykkiviin tähtiin eli kefeideihin perustuvan menetelmän etäisyyksien määrittämiseksi. Kefeidien kirkkausvaihteluiden jakson kesto riippuu niiden absoluuttisesta maksimikirkkaudesta. Vertaamalla samanjaksoisten kefeidien näennäisiä kirkkauksia saadaan selville niiden suhteelliset etäisyydet Maasta. Tällä menetelmällä saadaan selville kefeidien lähigalaksien etäisyydet 50 Mly:iin asti.

4. Monet tähdet kuolevat räjähtämällä. Tällainen supernovaräjähdys lähettää hetken aikaa enemmän valoa kuin muut galaksin tähdet yhteensä, ja se näkyy hyvin kauas. Supernovaräjähdykset tapahtuvat aina samalla tavalla. Niiden näennäisiä kirkkauksia vertaamalla voidaan määrittää galaksien etäisyyksiä 3 Gly:iin asti.

5. Kaukaisempien kohteiden etäisyydet määritetään punasiirtymän avulla. Punasiirtymästä voidaan laskea loittonemisnopeus, josta voidaan Hubblen lain avulla arvioida kohteen etäisyys.



▲ **Kefeidien jaksolliset muutokset saavat sen absoluuttisen kirkkauden vaihtelemaan samaan tahtiin. Kirkkauden maksimiarvo riippuu jakson pituudesta.**

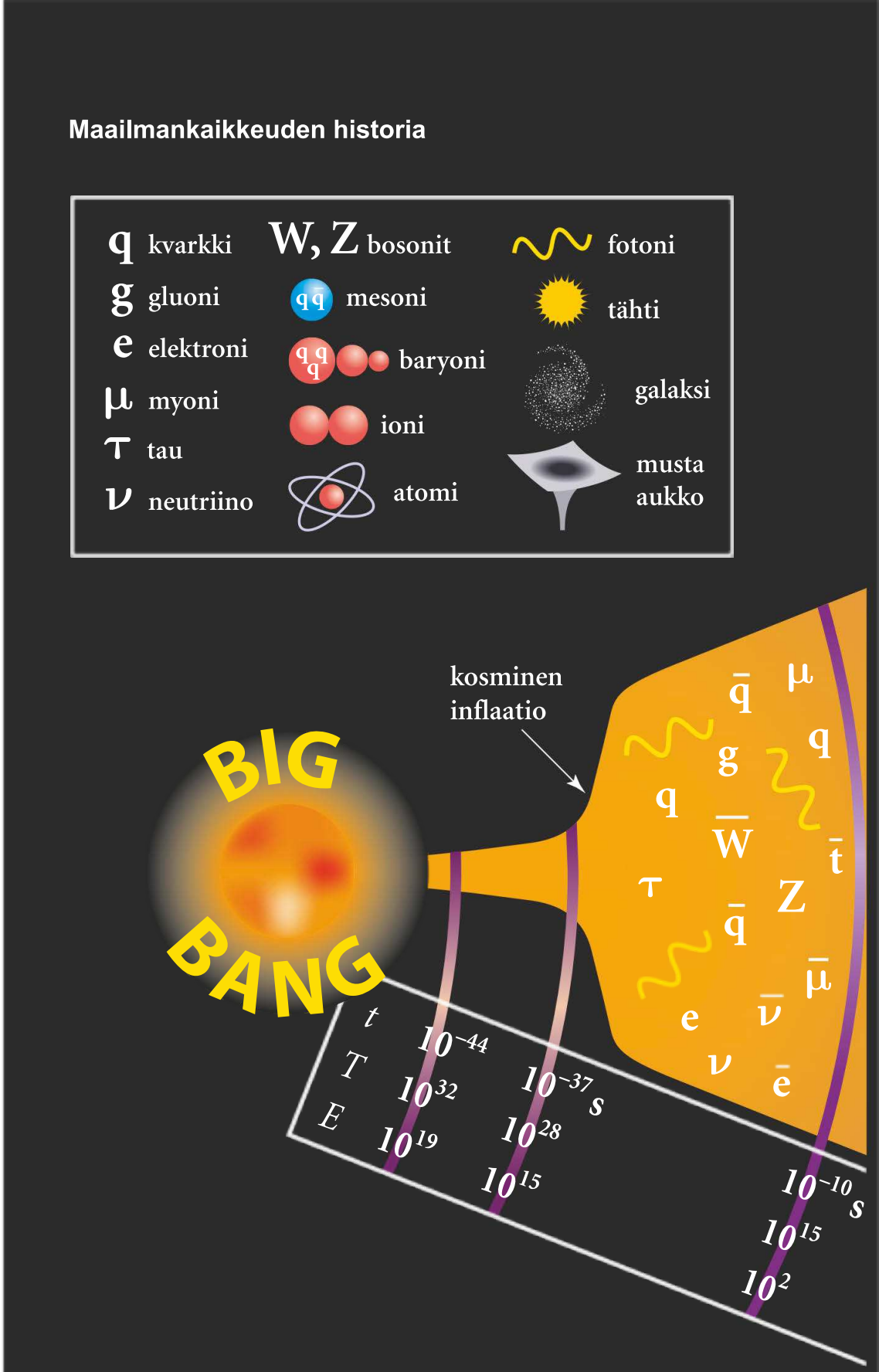
Maailmankaikkeuden historia

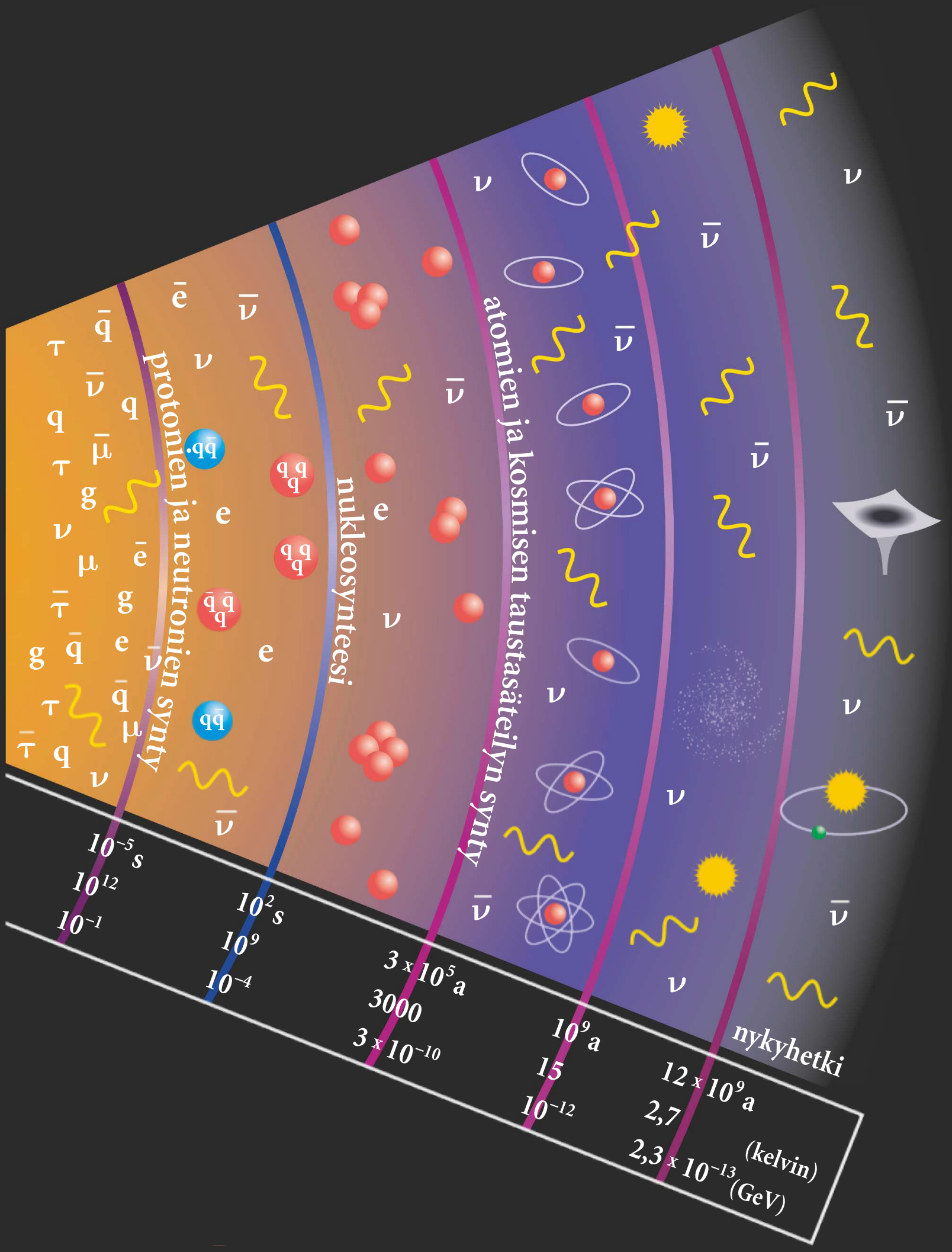
Maailmankaikkeuden historia on 13,7 miljardia vuotta vanha. Tärkeitä virstanpylväitä olivat kosminen inflaatio, protonien ja neutronien syntyminen, alkuaineiden syntyminen eli nukleosynteesi, atomien syntyminen ja suurien rakenteiden syntyminen.

Kosminen inflaatio

Kun maailmankaikkeutta tarkastelee tarpeeksi suuressa mittakaavassa, se näyttää hyvin tasalaatuiselta. Se on kuin galaksien muodostamaa kaasua. Tasalaatuisuus merkitsee, että maailmankaikkeuden eri osat ovat olleet historiansa aikana tekemisissä toistensa kanssa ja muuttuneet samankaltaisiksi, samaan tapaan kuin kylmä ja kuuma kaasu muuttuvat yhteen saatettuina samanlämpöisiksi.

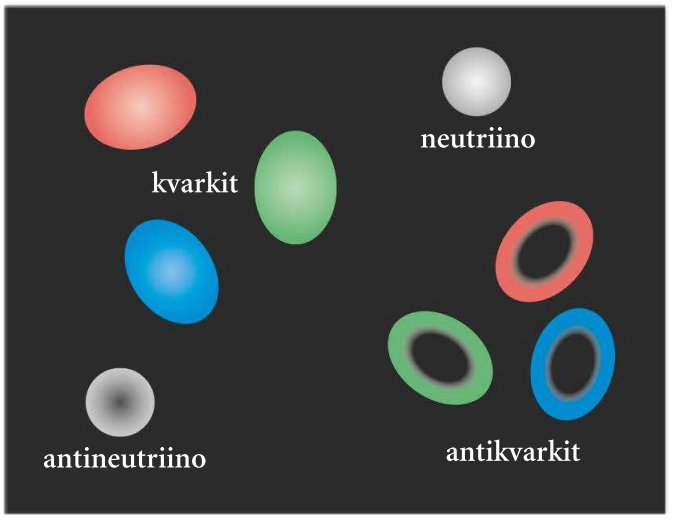
Koko näkyvän maailmankaikkeuden ajatellaan olevan peräisin hyvin pienestä alku-universumista, jonka eri osat olivat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja muuttuvat samankaltaisiksi. Maailmankaikkeuden kehityksen alkuvaiheessa tapahtui hyvin voimakas laajeneminen, jossa pieni vauvauniversumi kasvoi moninkertaiseksi ja aikaa myöten kehittyi nykyuniversumiksemme. Nopeaa laajenemisen vaihetta, joka tapahtui 10^{-35} s Big Bangin jälkeen, kutsutaan kosmiseksi inflaatioksi. Tasalaatuisesta alkutilasta kehittyi inflaation seurauksena homogeeninen ja isotrooppinen maailmankaikkeus.




protonien ja neutronien synty
nukleosynteesi
atomien ja kosmisen taustasäteilyn synty
nykyhetki
10^{-5} s
10^{12}
10^{-1}
10^{2} s
10^{9}
10^{-4}
3×10^{5} a
3000
3×10^{-10}
10^{9} a
15
10^{-12}
12×10^{9} a
2,7
(kelvin)
$2{,}3 \times 10^{-13}$ (GeV)

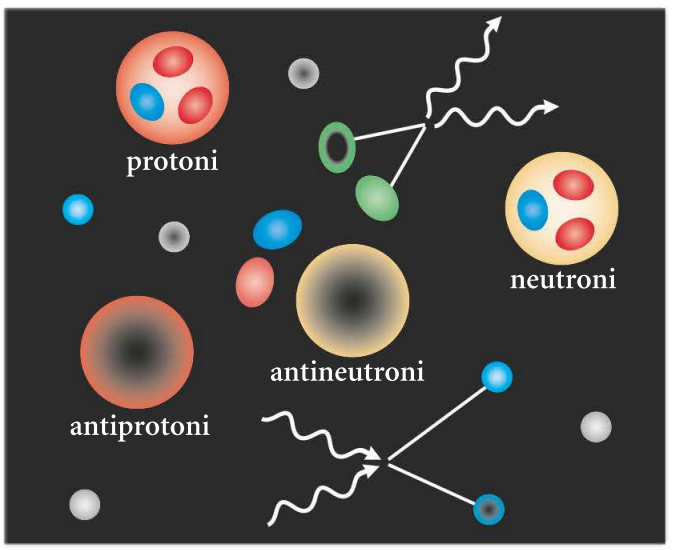
Alkuaineiden synty

Alkumaailmankaikkeus oli hyvin kuuma. Se koostui kvarkeista, leptoneista ja säteilystä. Säteilyllä tarkoitetaan tässä fotoneita ja muita vuorovaikutuksien kvantteja. Pysyviä rakenteita, kuten ytimiä ja atomeja, ei voinut syntyä, sillä nopeasti liikkuvat hiukkaset hajottivat ne välittömästi törmäyksillään. Maailmankaikkeuden laajeneminen alensi lämpötilaa, sillä hiukkasten liike-energiat ja säteilyn taajuudet pienenivät samassa suhteessa kuin avaruuden etäisyydet kasvoivat.



▲ **Kvarkit, leptonit ja voimien välittäjähiukkaset syntyvät inflaation päätyttyä noin 10^{-35} s alkuhetkestä.**

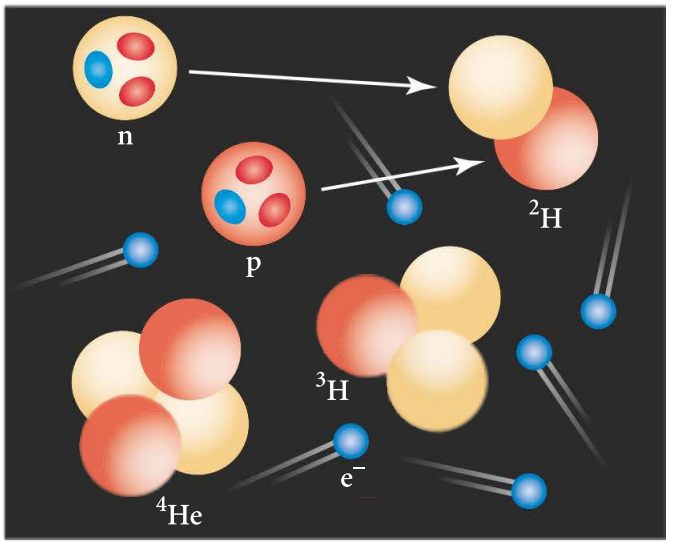
Kun maailmankaikkeuden syntymästä oli kulunut noin 10 mikrosekuntia, lämpötila oli laskenut noin 10^{12} asteeseen. Silloin hiukkasten törmäykset eivät enää pystyneet rikkomaan kvarkkien välisiä sidoksia ja kvarkit ja gluonit alkoivat muodostaa protoneita ja neutroneita. Alkuhetkestä oli kulunut silloin 10^{-5} s.



▲ **Kvarkeista alkoi muodostua protoneja ja neutroneita 10^{-5} s alkuhetkestä.**

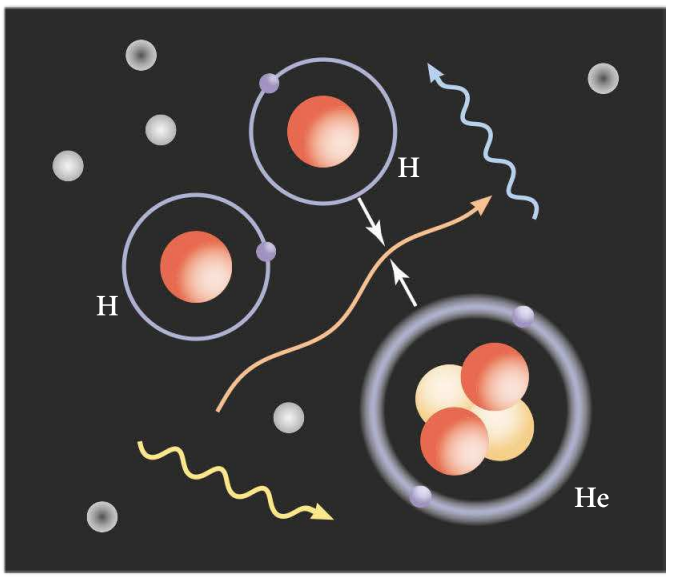
Kun lämpötila edelleen laski, protonit ja neutronit alkoivat muodostaa ytimiä. Tätä kutsutaan **nukleosynteesiksi**. Se alkoi, kun maailmankaikkeuden synnystä oli kulunut noin 200 sekuntia.

Protonit ja neutronit muodostivat pääasiassa heliumia (^{4}He), mutta jonkin verran myös deuteronia (^{2}H) ja litiumia (^{7}Li). Koska neutroni on hieman protonia raskaampi ja myös epästabiili ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$), protoneita oli nukleosynteesin alkaessa enemmän kuin neutroneita. Ylimääräisistä protoneista on peräisin vety.



▲ **Ytimien muodostuminen, nukleosynteesi, alkoi noin 200 s alkuhetkestä.**

Ytimiä syntyi alku-universumissa seuraavissa painosuhteissa: vetyä noin 75 %, heliumia noin 24 % ja deuteronia ja litiumia noin 1 %. Tämä on sopusoinnussa havaintotulosten kanssa. Raskaammat ytimet ovat syntyneet myöhemmin tähdissä ja tähtien räjähdyksissä.



▲ **Atomien muodostuminen alkoi 10^{13} s alkuhetkestä.**

Heliumin syntyminen

Helium syntyi varhaisessa maailmankaikkeudessa mm. tällaisten reaktioiden kautta:

$p + n \rightarrow {}^2H + \gamma$

${}^2H + {}^2H \rightarrow {}^3H + p$ tai ${}^3He + n$

${}^3H + {}^2H \rightarrow {}^4He + n$

${}^3He + {}^2H \rightarrow {}^4He + p$

Taustasäteily

Kun nukleosynteesi päättyi, maailmankaikkeuden lämpötila oli $3 \cdot 10^8$ K ja tiheys 100 kg $\cdot$ m^{-3}. Maailmankaikkeuden lämpötilalla tarkoitetaan sellaisen mustan kappaleen lämpötilaa, jota maailmankaikkeudessa olevan sähkömagneettisen säteilyn intensiteettijakautuma aallonpituuden funktiona vastaa (ks. sivu 13). Aine oli ionisoituneessa muodossa ja koostui kevyistä ytimistä, elektroneista ja neutriinoista.

Kun maailmankaikkeuden alusta oli kulunut 380 000 vuotta, hiukkasten energiat olivat pienentyneet maailmankaikkeuden laajenemisen takia niin paljon, että elektronit saattoivat sitoutua pysyvästi ytimien kanssa atomeiksi. Lämpötila oli silloin noin 3 000 K. Tätä maailmankaikkeuden kehitysvaihetta kutsutaan **rekombinaatioksi**.

Kun aine järjestyi atomeiksi, se muuttui samalla neutraaliksi. Sähkömagneettinen säteily saattoi sen jälkeen liikkua avaruudessa esteettä, eli avaruus muuttui läpinäkyväksi.

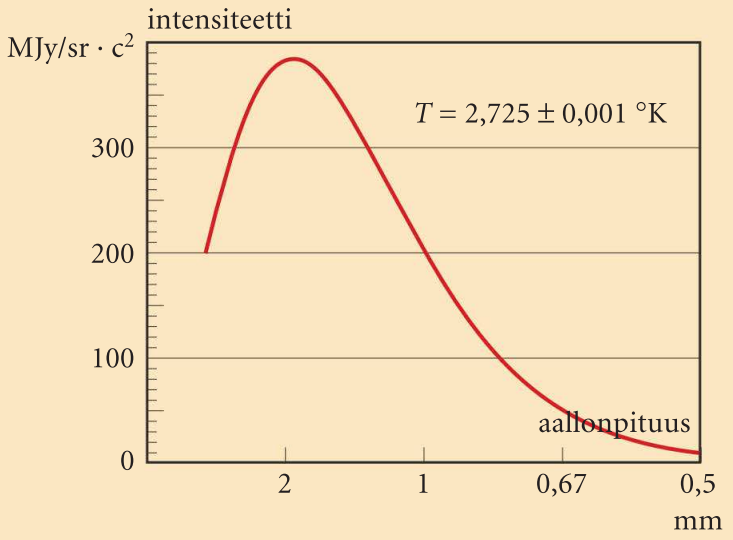
Tämä säteily täyttää edelleen avaruuden, mutta maailmankaikkeuden laajenemisen takia se on punasiirtynyt niin, että sen intensiteettijakautuma vastaa nykyisin lämpötilaa 2,725 K. Rekombinaation ajalta peräisin olevaa sähkömagneettista säteilyä kutsutaan **kosmiseksi taustasäteilyksi**. Säteilyn intensiivisimmän osan aallonpituus on 1,9 mm, minkä takia puhutaan myös kosmisesta mikroaaltotaustasta.

Ensimmäisinä kosmisen taustasäteilyn havaitsivat yhdysvaltalaiset Arnold Penzias ja Robert Wilson vuonna 1964. He huomasivat, että säteily tulee kaikista avaruuden suunnista hyvin tarkasti samanlaisena.

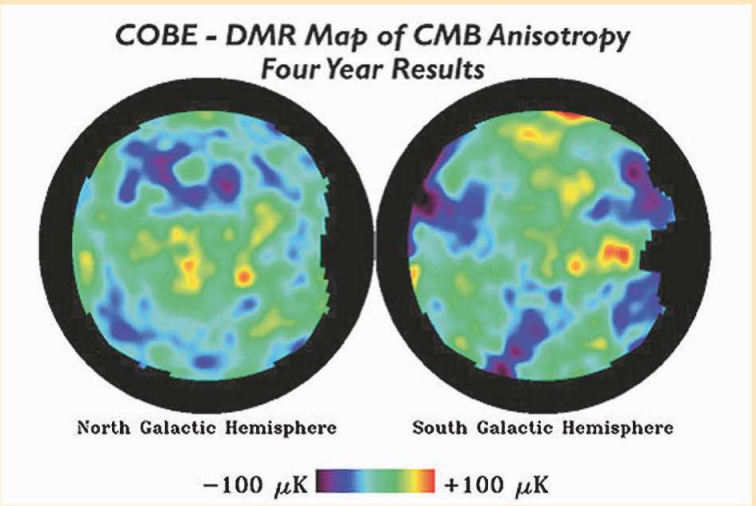
Havaintotekniikan kehittyessä tähtitieteilijät ovat pystyneet testaamaan Hubblen lakia hyvin kaukana sijaitsevien galaksien avulla. On osoittautunut, että kaukaisimpien galaksien loittonemisnopeus suhteessa niiden etäisyyteen on pienempi kuin Hubblen laki ilmoittaa. Tämä tarkoittaa, että maailmankaikkeuden laajenemisnopeus silloin, kun valo lähti liikkeelle näistä galakseista, oli pienempi kuin nykyään. Ensimmäiset 7 miljardia vuotta maailmankaikkeuden laajeneminen oli hidastuvaa, mutta sen jälkeen se on ollut kiihtyvää.

Vuonna 1992 COBE-satelliitti mittasi taustasäteilyn voimakkuutta huomattavasti suuremmalla tarkkuudella. Mittaus osoitti, että säteilyn voimakkuus aallonpituuden funktiona noudattaa hyvin tarkasti mustan kappaleen säteilylakia. COBE-kokeen päätutkijat John Mather ja George Smoot saivat vuoden 2006 fysiikan Nobelin palkinnon, Arnold Penzias ja Robert Wilson palkittiin vuonna 1978.

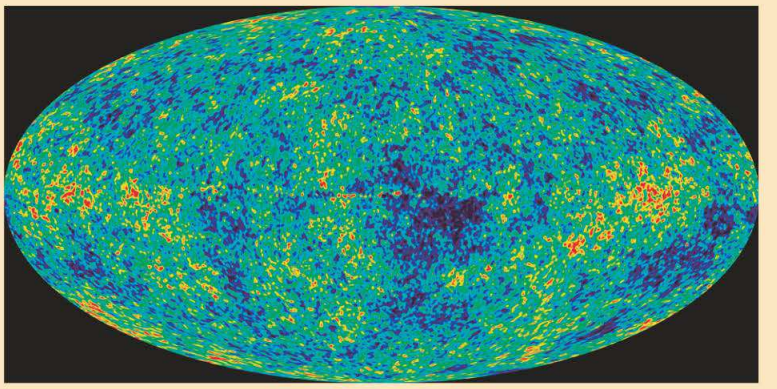
COBE:n mittaukset paljastivat myös, että säteily ei tule kaikista suunnista tarkalleen samanlaisena vaan säteilyn lämpötilassa on luokkaa 10^{-5} K olevia vaihteluita eli fluktuaatioita. Nämä fluktuaatiot johtuvat aineen pienen pienistä tiheyseroista taustasäteilyn syntyhetkellä. Tiheimmät alueet toimivat nykyisten galaksien siemeninä, sillä gravitaation vaikutuksesta aine keskittyi vuosimiljardien aikana niiden ympärille. Rakenteiden synty on monimutkainen tapahtuma. Tutkijat yrittävät selvittää sen yksityiskohtia rakentamalla tietokoneeseen maailmankaikkeudesta numeerisen mallin ja tutkimalla, miten aine siinä järjestyy ja mitkä tekijät vaikuttavat järjestymiseen.



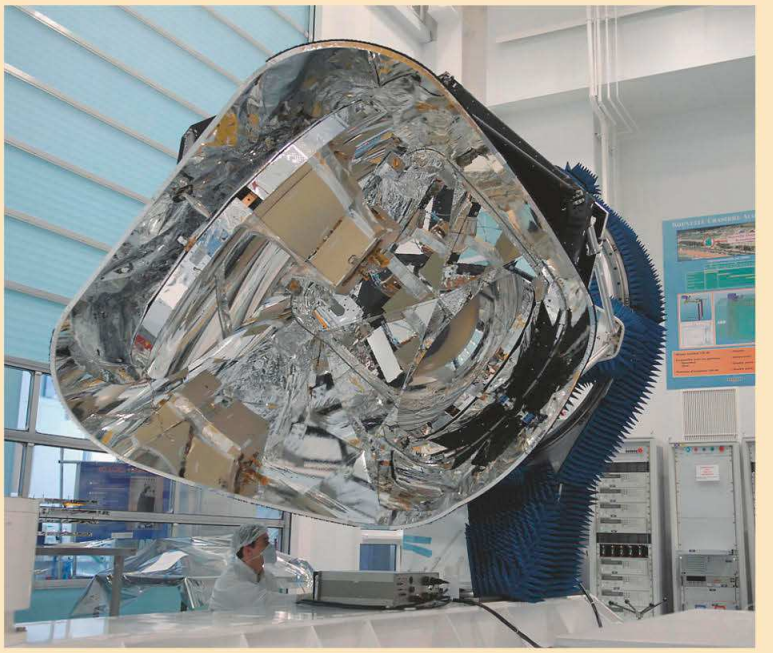
- COBE-satelliitin FIRAS (F*ar-Infrared Absolute Spectrophotometer*) -laitteella mitattu kosmisen taustasäteilyn voimakkuuden riippuvuus aallonpituudesta. Tämä on tarkin koskaan mitattu mustan kappaleen säteilyspektri.



- COBE-satelliitin DMR (*Differential Microwave Radiometers*) -laitteella mitattiin kosmisen taustasäteilyn lämpötilan vaihtelua eri suunnissa avaruutta. Kuva kattaa koko taivaanpallon. Punaiset alueet tarkoittavat keskimääräistä kuumempia suuntia ja siniset keskimääräistä kylmempiä suuntia. Poikkeamat keskimääräisestä lämpötilasta 2,725 K ovat suuruusluokkaa 10^{-5} K. Kuvasta on poistettu tunnetuista lähteistä, kuten Linnunradasta, tuleva mikroaaltosäteily.



- WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) -satelliitilla mitattu fluktuaatiospektri on huomattavasti tarkempi kuin COBE:n mittaama spektri, koska WMAP:lla on parempi suuntaerotuskyky.



- Euroopan avaruusjärjestön ESA:n PLANCK-teleskoopin peilejä laitteen testausvaiheessa. PLANCK:ssa on suomalaisten tekemä radiovastaanotin, joka mittaa taustasäteilyä aallonpituusväliltä 3,9–11,1 mm. PLANCK-teleskooppi laukaistaan avaruuteen Ariane-5-kantoraketilla vuonna 2008.

Kosmologian avoimia kysymyksiä – pimeä aine ja pimeä energia

Albert Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian mukaan aine ja energia vaikuttavat avaruuden ja ajan rakenteeseen. Teoriaa voidaan soveltaa myös koko maailmankaikkeuteen, ja alkuräjähdysteoria on sopusoinnussa sen kanssa. Kosmisen taustasäteilyn mittaukset ja muut kosmologiset mittaukset paljastavat, että galakseissa näkyvä tavallinen aine ei riitä selittämään maailmankaikkeuden käyttäytymistä eli sitä miten maailmankaikkeus laajenee. Valtaosa aineesta ja energiasta pitää olla muuta kuin sitä, minkä tunnemme.

Pimeää ainetta oletetaan olevan kaikkialla maailmankaikkeudessa. Sen olemassaolosta on saatu suoria todisteita tarkastelemalla galaksien ulkopuolella kiertävien vetypilvien liikettä. Vetypilvien nopeus (v) kiertoradallaan (säde r) riippuu vaikuttavan painovoiman suuruudesta. Newtonin II lain ja painovoimalain mukaan

$$\gamma \frac{m_{\text{pilvi}} M_{\text{galaksi}}}{r^2} = m_{\text{pilvi}} \frac{v^2}{r}.$$

Tästä seuraa, että nopeuden riippuvuus kiertoradan säteestä tulisi olla

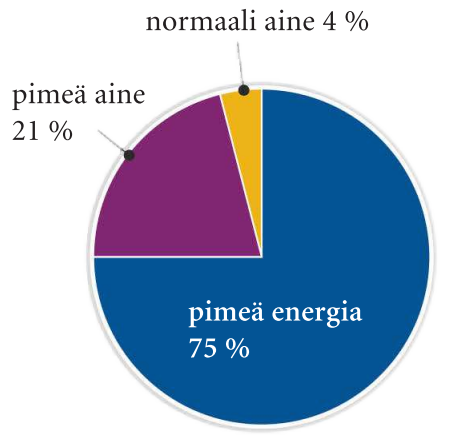
$$v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}.$$

Mittaustulokset osoittavat kuitenkin, että nopeus säilyy monien galaksien tapauksessa muuttumattomana, vaikka etäisyys galaksista kasvaa. Tämä merkitsee, että näkyvän aineen lisäksi galaksissa ja sen ympärillä on runsaasti näkymätöntä eli pimeää ainetta, jonka keskellä vetypilvi liikkuu. Painovoiman takia pimeä aine on keskittynyt galaksien ja galaksiryppäiden läheisyyteen. Pimeän aineen koostumusta ei vielä tunneta. Yksi mahdollisuus ovat supersymmetrian ennustamat hiukkaset, joista kevyimmän lajin oletetaan olevan pysyvä.

Viimeaikaiset mittaukset osoittavat, että maailmankaikkeus ei ole aina laajentunut yhtä nopeasti kuin se laajenee nyt, vaan laajeneminen on kiihtyvää.

Aine ja energia pyrkivät gravitaation takia hidastamaan maailmankaikkeuden laajenemista, joten kiihtyvä laajeneminen vaatii, että avaruudessa on jotain, jonka vaikutus on päinvastainen kuin painovoiman. Tällaisen vaikutuksen aiheuttajaa kutsutaan **pimeäksi energiaksi**. Toistaiseksi ei tiedetä, mikä on pimeän energian luonne ja alkuperä.

Pimeä aine ja pimeä energia siis hallitsevat maailmankaikkeutta. Vain 4 % kaikesta maailmankaikkeuden sisältämästä energiasta on tavallista, protoneista, neutroneista ja elektroneista muodostunutta ainetta. Tämä on galakseissa olevaa ainetta. Loppu on pimeää ainetta (21 %) ja pimeää energiaa (75 %).



▲ **Maailmankaikkeutta hallitsevat tuntemattomat pimeä energia ja pimeä aine.**

KERTAUSTEHTÄVIÄ

Luku 1

1. Sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituudet ovat välillä 250 nm … 450 nm, osuu cesium-metallin pintaan. Millä välillä irtoavien fotoelektronien liike-energiat voivat vaihdella, kun elektronien irrotustyö cesiumista on 1,8 eV?

2. Sähkömagneettisen säteilyn energia on 1,3 keV. Laske säteilyn
a) taajuus
b) aallonpituus tyhjiössä.

3. Erään tähden pintalämpötila on 6 500 K. Mikä on tämän tähden
a) väri
b) intensiteettimaksimia vastaavan fotonin energia?

4. Selitä, miten Planckin vakion arvo voidaan määrittää kokeellisesti.

Luku 2

5. Elektronisuihku on kiihdytetty 1,75 kV:n jännitteellä. Laske elektronien de Broglien aallonpituus.

6. Röntgenputkesta saatavan säteilyn aallonpituuden alaraja on 65 pm. Mikä on röntgenputken kiihdytysjännite?

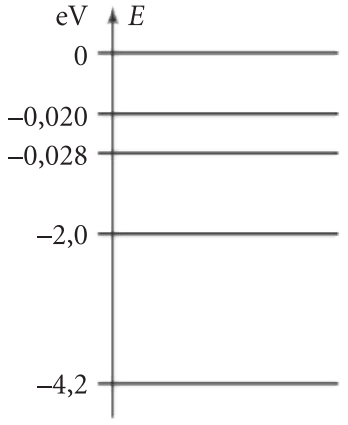
7. Kun suolakidettä säteilytetään röntgensäteilyllä, havaitaan varjostimella teräviä interferenssimaksimeita. Miten interferenssimaksimeiden synty selitetään?

8. Röntgenputken jännite on 35 kV. Mitä aallonpituuksia siitä saatavassa röntgensäteilyssä havaitaan?

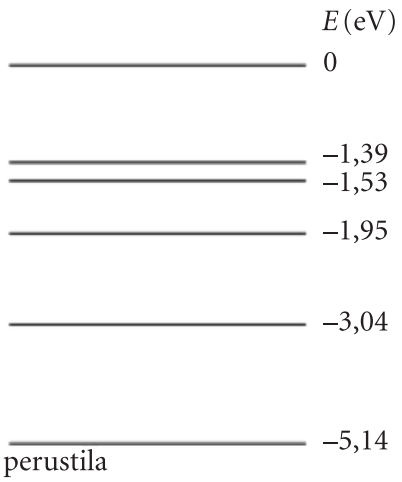
Luku 3

9. **a)** Mikä ero emissio- ja absorptiospektrillä on? Esitä energiatasokaavion avulla molempien syntymekanismi.
b) Fluoresoivan sinkkisulfidilevyn päälle asetetaan pimeässä huoneessa sininen ja punainen suodin. Levyä valaistaan hetken valkoisella valolla. Valotuksen jälkeen punaisen suotimen kohdalta levy on musta, kun taas sinisen suotimen alta ja muualta levy loistaa kellanvihreänä. Selitä ilmiö ja havainnollista selitystä energiatasokaaviolla.

10. Revontulissa loimuava vihreä, punainen ja sininen valo on peräisin joko hapen tai typen atomeista. Kuvassa on esitetty osa happiatomin energiatasokaaviota. Mikä väri tai mitkä värit ovat peräisin hapesta? Piirrä siirtymät näkyviin.



11. Natriumilla on täysien pääkuorien ulkopuolella yksi elektroni. Niin ollen sitä voidaan tarkastella yksielektronisena vedyn kaltaisena atomina. Kuvassa on esitetty yksinkertaistettu osa natriumin energiatasokaaviota.



a) Natriumhöyryn atomeja pommitetaan purkausputkessa elektroneilla. Kuinka suuri täytyy elektronin energian vähintään olla, jotta se pystyisi ionisoimaan perustilassa olevan natriumatomin?

b) Mitä energioita voi esiintyä putkesta tulevassa säteilyssä, jos pommittavien elektronien maksimienergia on 3,3 eV.

c) Natriumille tunnusomaisen keltaisen valon aallonpituus on 589 nm. Minkä siirtymän tuloksena tämä säteily syntyy?
Piirrä kuvio, josta ilmenevät kohdissa a, b ja c tarkastellut siirtymät. (Yo syksy 1991, teht. 9)

12. Elektroneja kiihdytetään röntgenputkessa 12,3 kV:n jännitteellä. Anodi on kuparia. Laske tarvittavat tiedot ja hahmottele röntgenputken lähettämä spektri niin, että vaaka-akselilla on aallonpituus. Kuparin ominaissäteilyn säteilyn α-viivan aallonpituus on 0,154 nm ja β-viivan aallonpituus on 0,139 nm.

13. Lasiputkessa olevaa harvaa vetykaasua pommitettiin elektronisuihkulla. Elektronien suurin liike-energia oli 13,0 eV. Putkesta tulevaa säteilyä tutkittiin spektrometrillä. Mitä näkyvän alueen emissioviivoja havaittiin? Piirrä energiatasokaavio, josta käy ilmi vetyatomien virittyminen ja syntyvät spektriviivat.

Luku 4

14. Laske typpi-15-ytimen massavaje.

15. Miten määritellään
a) ytimen sidosenergia
b) sidososuus?

16. Laske ytimen $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ sidosenergia ja sidososuus.

17. Luonnossa esiintyvä typpi on kahden isotoopin seos. Isotooppien massaluvut ovat 14 ja 15. Ilmoita näiden isotooppien järjestysluvut ja neutroniluvut.

Luku 5

18. Millä tavalla
a) alfasäteily ja beetasäteily
b) hehkulampun valo ja gammasäteily
ovat samankaltaisia ja missä suhteessa ne eroavat toisistaan?

19. Rikin $^{35}\mathrm{S}$-isotoopin puoliintumisaika on 87,2 d. Laske hajoamisvakio ja määritä, kuinka pitkän ajan kuluttua näytteen aktiivisuus on pienentynyt kymmenesosaan alkuperäisestä.

20. Luonnossa uraanin yleisimmät isotoopit ovat ^{238}U ja ^{235}U. Nykykäsityksen mukaan nämä raskaat uraani-isotoopit ovat syntyneet vanhojen tähtien supernovaräjähdyksissä. Sivun 179 nuklidikartassa on esitetty isotooppien suhteelliset runsaudet ja puoliintumisajat. Arvioi, kuinka paljon aikaa on kulunut siitä supernovaräjähdyksestä, jossa nämä isotoopit syntyivät. Oletetaan, että molempia uraani-isotooppeja syntyi räjähdyksessä yhtä paljon.

21. Aikanaan käytettiin lääketieteessä ja tekniikassa yleisesti α – aktiivista radiumisotooppia ^{226}Ra.

a) Kirjoita ^{226}Ra:n hajoamisreaktio ja päättele, mikä säteilyturvallisuusongelma liittyi suurten radiummäärien säilyttämiseen laboratoriossa, vaikka säilytys tapahtui riittävän paksuseinäisissä lyijyastioissa.

b) Laske radiumytimen hajoamisessa vapautuvan α-hiukkasen nopeus edellyttäen, että reaktiossa ei synny gammasäteilyä. (Yo kevät 1999, teht. 14)

22. Kun luonnon hopeaa säteilytetään termisillä neutroneilla, syntyy kahta β^--aktiivista lyhytikäistä isotooppia ^{110}Ag ja ^{108}Ag.

a) Kirjoita näiden radioisotooppien hajoamisreaktiot.

b) Kun neutroneilla aktivoidun hopeanäytteen säteilyä seurattiin geigerlaskurilla mittaamalla 20 sekunnissa kertynyt pulssimäärä ajan funktiona, saatiin seuraavat tulokset:

aika (s)	20	50	80	110	140	170	200
pulssimäärä	18 001	9 929	6 067	4 105	3 158	2 491	2 065

aika (s)	230	260	290	320	350	380	410
pulssimäärä	1 720	1 451	1 277	1 135	962	846	720

Esitä graafisesti pulssimäärän logaritmi ajan funktiona ja määritä kuvan avulla pitkäikäisimmän isotoopin ^{108}Ag puoliintumisaika. (Isotooppi ^{110}Ag on oleellisesti lyhytikäisempi kuin ^{108}Ag.)
(Yo kevät 1998, teht. 14)

Luku 6

23. Mitä tarkoittaa

a) fuusio

b) fissio

c) ketjureaktio

d) ydinreaktion reaktioenergia?

24. Laske fissioreaktion $^{235}\text{U} \rightarrow {}^{90}\text{Kr} + {}^{142}\text{Ba} + 3\text{n}$ reaktioenergia. Tytärydinten massat ovat ^{90}Kr 89,91929 u ja ^{142}Ba 141,91646 u.

25. Mitä tarkoittaa

a) ydinreaktorin hidaste

b) ydinreaktorin polttoainesauva

c) ydinreaktorin jäähdyte

d) painevesireaktori ja kiehutusvesireaktori?

26. Olkiluodon ydinvoimalaitoksen reaktorin lämpöteho on 2500 MW. Kuinka suuri on vuorokaudessa fissioituvan uraanin massa, jos reaktion keskimääräinen energia muuttuu kokonaan lämpöenergiaksi? Yhdessä fissioreaktiossa vapautuva energia on 200 MeV

Luku 7

27. **a)** Luettele perushiukkaset.
b) Millä kahdella eri tavalla perushiukkaset luokitellaan?

28. Mitkä vuorovaikutukset kokevat
a) elektroni
b) protoni
c) neutriino?

29. Nykyisin yhä tehokkaampien hiukkaskiihdyttimien rakentamiseen käytetään valtavasti varoja. Miksi hiukkaskiihdyttimet ovat nykyfysiikassa keskeisiä tutkimuslaitteita?

30. Millä nopeudella avaruusaluksen pitäisi matkustaa Maahan nähden, jotta Kuun ja Maan välinen etäisyys olisi aluksesta mitattuna 190 000 km?

31. Vapaiden neutronien keskielinaika on 896 sekuntia. Kuinka monta kierrosta vakionopeudella 0,920 c etenevä neutronijouko ehtii kiertää kiihdytinrenkaassa, jonka halkaisija on 21,0 km, ennen kuin hiukkasista on hajonnut puolet?

Tehtävien vastaukset

Luku 1

6. a) $3{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

b) $1{,}2 \cdot 10^{-27}$ $\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$

9. 1,3 eV

10. a) 1,1 mm

b) 2,4 μm

11. 290 K

12. a) $3{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

b) $1{,}2 \cdot 10^{-27}$ $\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$

13. 1,1 μm

17. a) $4{,}4 \cdot 10^{14}$ Hz; $5{,}1 \cdot 10^{14}$ Hz

b) 1,8 eV; 2,1 eV

18. 2,3 eV

19. a) 0,90 eV

b) 3,5 eV

c) 0,75 V

20. 550 nm

21. a) 2,0 eV

b) 650 nm

c) $4{,}0 \cdot 10^{-15}$ eVs

22. a) 120 nm

b) 1,2 nm

Luku 2

3. a) $1{,}6 \cdot 10^{18}$ Hz

b) 6,5 keV

5. 65 pm

7. 64°

8. 11,1 kV

9. 10,3 kV

13. a) 8,3 nm

b) 0,10 nm

c) 2,3 pm

14. $5{,}5 \cdot 10^{-13}$ m

15. $4{,}1 \cdot 10^{-32}$ m

16. 110 pm

17. 150 V

Luku 3

4. a) –3,40 eV

b) –1,51

c) 1,9 eV

5. a) 91,1 nm

b) 4050 nm

6. 486 nm

7. 91,1 nm

8. a) 58,2 mm; 5,2 GHz

b) 0,0213 meV

c) 13,6 eV

9. a) 91,2 nm

b) 103 nm, 2,9 Pm

10. c) 6

12. a) 434 nm

b 10,9 eV

13. a) 50,4 nm

b) 2,94 Mm/s

14. b) 2,8 eV; 1,8 eV; 1,0 eV; 440 nm; 690 nm; 1200 nm

15. –3,03 eV

16. a) 121,6 nm

b) 102,6 nm

17. a) 6

b) 2,47 PHz; 0,617 PHz

18. a) 12,10 eV

b) 102,6 nm; 121,6 nm; 656,0 nm

19. a) 2,22 eV

b) 28,3 km/s

21. 3 400 nm; 630 nm; 1 100 nm

22. 389 nm; 590 nm ja 1140 nm

23. a) 25,51 kV,

b) $\lambda \geq 48{,}6$ pm; 49,7 pm, 56,4 pm; 420,3 pm

24. 1, 2, 5

26. b) 12,4 eV

27. a) 1,2536 keV; 0,989 nm

b) 1,3050 kV

c) 21 400 km/s

Luku 4

4. $1{,}4447 \cdot 10^{17}$ kg/m^3

5. a) 60 N

b) $5 \cdot 10^{-35}$ N

8. 8 ja 8; 8 ja 9; 8 ja 10

10. $2{,}3882 \cdot 10^{-3}$ u

11. a) 0,1370060392 u

b) 1,7568195518 u

12. 43 000 vuotta

15. 8,032 MeV

16. a) 527 MeV

b) 8,78085 MeV

Luku 5

4. b) $2{,}047 \cdot 10^{-3}$ u

c) 1,907 MeV

d) 1,854 MeV; 0,05301 MeV

5. b) 0,004588 u

c) 4,274 MeV

e) 4,202 MeV; $1{,}423 \cdot 10^{7}$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

8. a) $1{,}526 \cdot 10^{-3}$ u; 1,421 MeV

b) $5{,}914 \cdot 10^{-3}$ u; 5,509 MeV

9. 201,97215 u

10. b) 0,8365 MeV

13. b) $1{,}54 \cdot 10^{-4}$ u

14. a) 0,5110 MeV

b) 938,3 MeV

15. 2,329 MeV

17. a) 1/32

b) 8

c) $2{,}10 \cdot 10^{-6}$ $\frac{1}{\text{s}}$

18. a) 12,7 d

b) 53,3 d

19. 7,04 d

20. a) $1{,}4 \cdot 10^{-11}$ $\frac{1}{\text{s}}$

b) $1{,}8 \cdot 10^{12}$

c) $1{,}8 \cdot 10^{11}$ Bq

d) $4{,}6 \cdot 10^{10}$ Bq

21. a) 6,5 GBq

b) 0,067 GBq

22 b) 23,5 min

23. a) $4{,}2 \cdot 10^{16}$ Bq; $3{,}1 \cdot 10^{16}$ Bq

b) $2{,}6 \cdot 10^{16}$ Bq; $0{,}0030 \cdot 10^{13}$ Bq

24. b) 8 200 a
27. b) 120 Bq
28. b) 25 min
29. c) 2,6 kBq/l
30. a) 2,3 dm
b) 6,8 dm

Luku 6

5. $1{,}57 \cdot 10^{-19}$ kg
7. 160 MeV
11. $2{,}6 \cdot 10^{6}$ kg
12. $17{,}8 \cdot 10^{3}$ kg
13. 1200 kg
14. $3{,}6 \cdot 10^{24}$
17. $2{,}4\ 10^{17}$

Luku 7

12. a) $0{,}97\,c\ (= 2{,}90 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}})$
b) $0{,}66\,c\ (= 1{,}98 \cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}})$
13. 1,8 s
14. 0,50 %
15. 0,14 *c*
16. 0,63 *c*

Kertaustehtävien vastaukset

1. 3,2 eV … 0 eV
2. a) $3{,}1 \cdot 10^{17}$ Hz
b) 0,95 nm
3. b) 2,8 eV
5. 29 pm
6. 1,9 kV
8. 35 pm
11. a) 5,14 eV
b) 3,19 eV; 1,09 eV; 2,10 eV
12. 0,101 nm
13. 653 nm; 486 nm
14. 0,1239875593 u
16. 1732 MeV; 7,7 MeV
17. 7 ja 7 sekä 7 ja 8
19. $7{,}95 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{l}}{\text{d}}$; 289,7 d
20. $5{,}97 \cdot 10^{9}$ a
21. $15{,}2 \cdot 10^{6}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$
22. 2,4 min
24. 169,7 MeV
26. 2,6 kg
30. 0,87 c
31. 10 700 kertaa

Hakemisto

A

aaltohiukkasdualismi 35
absorboitunut annos 100
absorptio 52
absorptiospektri 11, 52
aikadilaatio 138
aktiivisuus 94, 96
alkeishiukkaset 131
alkuaineiden synty 121
alkuräjähdysteoria 157
alfasäteily 83, 85
annihilaatio 131
antihiukkanen 131
antineutriino 150
antikvarkki 132
atomimalli
  Thomsonin 44
  Rutherfordin 45
  Bohrin 49
  kvanttimekaaninen 55
  kuorimalli 56
atomimassayksikkö 74

B

beetasäteily 83, 89
Big Bang -teoria 157
bikini 120
Braggin laki 33

C

Comptonin sironta 23, 93

D

de Broglien lait 35
dosimetri 99
duaalinen malli 40

E

efektiivinen annos 100
ekvivalenttiannos 100
elektronisieppaus 91
emissio
  spontaani 52, 61
  stimuloitu 61
emissiospektri 10, 52
energiatasokaavio 52, 56

F

fermioni 152
fissio 110
fissiovoimala 115
fluoresenssi 59
fosforenssi 59
fotiino 152
fotoelektroni 19
fotoni 15, 52, 59, 149
fuusio 110
fuusio tähdissä 121

G

gammasäteily 83, 93
geigerputki 99
gluoni 149, 150
gravitoni 149

H

hadroni 132
hajoamisenergia 83
hajoamislaki 94, 96
heikkenemislaki 104
Higgsin hiukkanen 152
Higgsin kenttä 152
hiukkasilmaisimet 134
hiukkaskiihdyttimet 135

I

intensiteetti 9
irrotustyö 21
isotooppi 73
ITER 124

J

jaksollinen järjestelmä 57
jarrutussäteily 30
jäähdyte 116

K

kefeidi 159
keskielinaika 132, 133
ketjureaktio 112
kevytvesireaktori 115
kiehutusvesireaktori 115, 118
kosminen inflaatio 160
kvanttiluku 50, 55, 56
kvanttisähködynamiikka 149
kvarkki 131, 132

L

laser 61
leptoni 131, 132
LHC-kiihdytin 135, 152
Lorentzin tekijä 138

M

massavaje 75
massan ja energian vastaavuus 77
musta aukko 153
musta kappale 13
mustan kappaleen säteily 13
myoni 132, 138

N

neutriino 150
nuklidi 72

O

ominaissäteily 30
orbitaali 55

P

painevesireaktori 115, 117
parallaksi 158
perushiukkaset 131, 148
perusvuorovaikutukset 133
pimeä aine 165
pimeä energia 165
pituuskontraktio 139
Planckin kvanttihypoteesi 15
Planckin vakio 15
polttoainesauva 116
protoni-protoniketju 121
punasiirtymä 156, 159
puoliintumisaika 95
pysäytysjännite 20

R

radioaktiivinen aine 82
radiohiiliajoitus 98
rajataajuus 19
raskasvesireaktori 115
rekombinaatio 163
röntgensäteily 28, 63
röntgendiffraktio 32
Rutherfordin koe 45

S

selektroni 152
sidosenergia 75
skalaaribosoni 152
spektri 47
spektrianalyysi 64
spektroskopia 11
spontaani fissio 92
standardimalli 148, 149
supernova 159
supersymmetria 152
supersäieteoria 155
suppea suhteellisuusteoria 137
säteilyilmaisimet 99
säteilyn mittaaminen 99
säteilyturvallisuus 99
säätösauva 116

T

taustasäteily 163
tilafunktio 40, 55
Tokamak 123
törmäyttimet 136

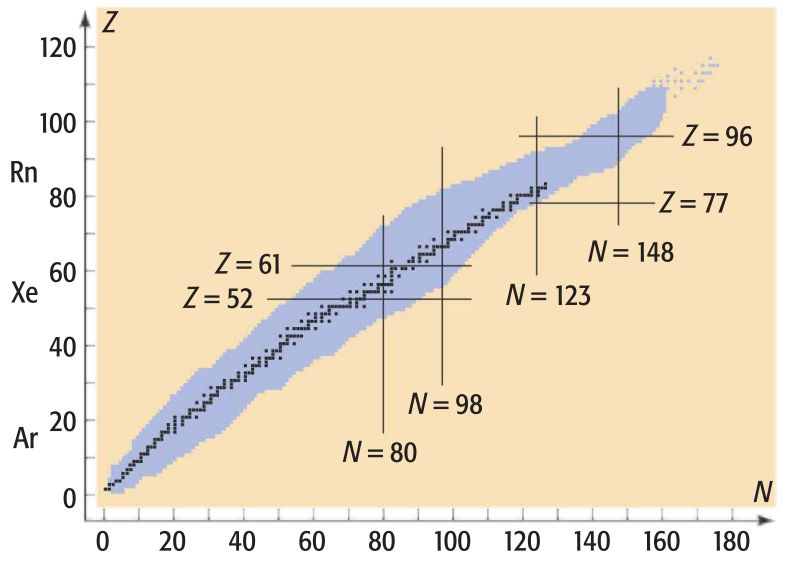
V,W

valosähköilmiö 18
vektoribosoni 152
vedyn spektri 47, 52
vetyatomin energiatilat 50
Wienin siirtymälaki 14
viivaspektri 9, 47
virittyminen 52
viritystilan purkautuminen 52
välibosoni 149, 151
välittäjähiukkanen 131, 149
värilämpötila 17
värivaraus 150

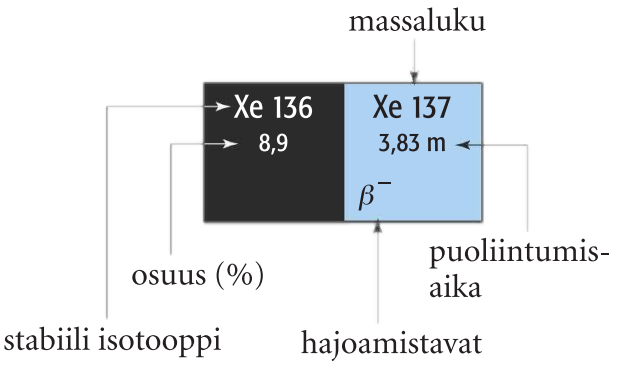
Y

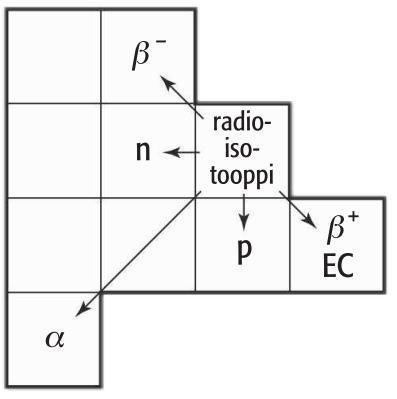
ydin 70
ydinvoima 71
ydinreaktion energia 111
ydinsäteily 83
ydinfuusio 113
yleinen suhteellisuusteoria 153

Z									
61	Pm 141 20,9 m β^+	Pm 142 40,5 s β^+	Pm 143 265 d EC	Pm 144 1,0 a EC β^+	Pm 145 17,7 a α EC	Pm 146 5,53 a EC β^-	Pm 147 2,62 a β^-	Pm 148 5,37 d β^-	Pm 149 53,1 h β^-
60	Nd 140 3,37 d EC	Nd 141 2,5 h EC β^+	Nd 142 27,2	Nd 143 12,2	Nd 144 23,8 $2{,}29 \cdot 10^{15}$ a α	Nd 145 8,3	Nd 146 17,2	Nd 147 10,98 d β^-	Nd 148 5,7
59	Pr 139 4,5 h EC β^+	Pr 140 3,4 m β^+	Pr 141 100	Pr 142 19,13 h EC β^-	Pr 143 13,57 d β^-	Pr 144 17,3 m β^-	Pr 145 5,98 h β^-	Pr 146 24,0 m β^-	Pr 147 13,6 m β^-
58	Ce 138 0,251	Ce 139 137,6 d EC	Ce 140 88,450	Ce 141 32,50 d β^-	Ce 142 11,114	Ce 143 33,0 h β^-	Ce 144 284,8 d β^-	Ce 145 2,98 m β^-	Ce 146 13,5 m β^-
57	La 137 $6 \cdot 10^4$ a EC	La 138 0,090 $1{,}05 \cdot 10^{11}$ a EC β^-	La 139 99,910	La 140 40,272 h β^-	La 141 3,93 h β^-	La 142 92,5 m β^-	La 143 14,23 m β^-	La 144 40,9 s β^-	La 145 24,8 s β^-
56	Ba 136 7,854	Ba 137 11,232	Ba 138 71,698	Ba 139 83,06 m β^-	Ba 140 12,75 d β^-	Ba 141 18,3 m β^-	Ba 142 10,7 m β^-	Ba 143 14,5 s β^-	Ba 144 11,5 s β^-
55	Cs 135 $2 \cdot 10^6$ a β^-	Cs 136 13,16 d β^-	Cs 137 30,17 a β^-	Cs 138 32,2 m β^-	Cs 139 9,3 m β^-	Cs 140 63,7 s β^-	Cs 141 24,94 s β^-	Cs 142 1,70 s β^-	Cs 143 1,78 s β^-
54	Xe 134 10,4357	Xe 135 9,10 h β^-	Xe 136 8,8573	Xe 137 3,83 m β^-	Xe 138 14,1 m β^-	Xe 139 39,7 s β^-	Xe 140 13,6 s β^-	Xe 141 1,72 s β^-	Xe 142 1,24 s β^-
53	I 133 20,8 h β^-	I 134 52,0 m β^-	I 135 6,61 h β^-	I 136 84 s β^-	I 137 24,2 s β^-	I 138 6,4 s β^-	I 139 2,29 s β^-	I 140 0,86 s β^-	I 141 0,43 s β^-
52	Te 132 76,3 h β^-	Te 133 12,5 m β^-	Te 134 41,8 m β^-	Te 135 18,6 s β^-	Te 136 17,5 s β^-	Te 137 2,5 s β^-	Te 138 1,4 s β^-	Te 139 > 300 ns β^- ?	Te 140 > 300 ns β^- ?
N	80		82		84		86		88

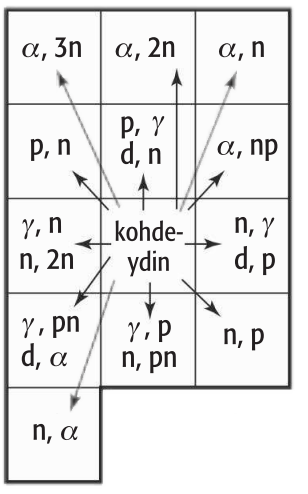


Pm 150 2,7 h β^-	Pm 151 28,4 h β^-	Pm 152 15 m β^-	Pm 153 5,3 m β^-	Pm 154 2,7 m β^-	Pm 155 41,5 s β^-	Pm 156 26,7 s β^-	Pm 157 10,6 s β^-	Pm 158 4,8 s β^-	Pm 159 1,5 s β^-
Nd 149 1,73 h β^-	Nd 150 5,6 $1{,}7 \cdot 10^{19}$ a β^-	Nd 151 12,4 m β^-	Nd 152 11,4 m β^-	Nd 153 28,9 s β^-	Nd 154 25,9 s β^-	Nd 155 8,9 s β^-	Nd 156 5,5 s β^-	Nd 157 > 300 ns β^- ?	Nd 158 > 300 ns β^- ?
Pr 148 2,27 m β^-	Pr 149 2,25 m β^-	Pr 150 6,1 s β^-	Pr 151 18,9 s β^-	Pr 152 3,8 s β^-	Pr 153 4,3 s β^-	Pr 154 2,3 s β^-	Pr 155 > 300 ns β^- ?	Pr 156 > 300 ns β^- ?	Pr 157
Ce 147 57 s β^-	Ce 148 48 s β^-	Ce 149 5 s β^-	Ce 150 4,1 s β^-	Ce 151 1,0 s β^-	Ce 152 1,4 s β^-	Ce 153 > 300 ns β^- ?	Ce 154 > 300 ns β^- ?	Ce 155 > 300 ns β^- ?	Ce 156
La 146 6,3 s β^-	La 147 4,0 s β^-	La 148 1,43 s β^-	La 149 1,05 s β^-	La 150 0,51 s β^-	La 151 > 300 ns β^- ?	La 152 > 300 ns β^- ?	La 153 > 300 ns β^- ?	La 154	98
Ba 145 4,3 s β^-	Ba 146 2,2 s β^-	Ba 147 0,89 s β^-	Ba 148 0,61 s β^-	Ba 149 344 ms β^-	Ba 150 0,3 s β^-	Ba 151 > 300 ns β^-	Ba 152	Ba 153	N →
Cs 144 1,0 s β^-	Cs 145 0,59 s β^-	Cs 146 0,32 s β^-	Cs 147 0,23 s β^-	Cs 148 158 ms β^-	Cs 149 > 50 ms β^- ?	Cs 150 > 50 ms β^- ?	Cs 151 > 50 ms β^- ?	Cs 152 > 50 ms β^- ?	
Xe 143 511 ms β^-	Xe 144 388 ms β^-	Xe 145 188 ms β^-	Xe 146 146 ms β^-	Xe 147 130 ms β^-	94		96		
I 142 ~ 0,2 s β^-	I 143 > 300 ns β^-	I 144 > 300 ns β^-	92						
Te 141 > 300 ns β^- ?	Te 142 > 300 ns β^- ?								
90									





radioaktiivinen hajoaminen



ydinreaktiot

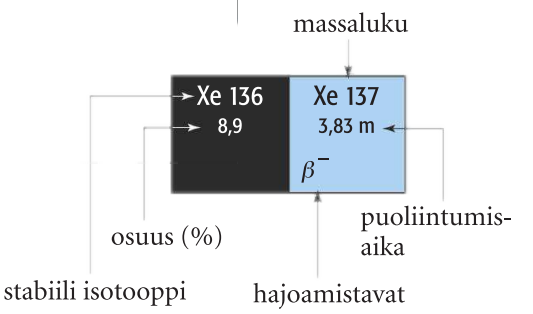
Z	124	126	128	130	132	134
94						Pu 228 1,1 s α Pu 229 90 s α
93					Np 225 ? α Np 226 31 ms α	Np 227 0,51 s α Np 228 61,4 s α EC
92		U 217 16 ms α U 218 0,51 ms α U 219 ~ 42 μs α		U 222 1 μs α U 223 18 μs α	U 224 0,7 ms α U 225 59 ms α	U 226 0,28 s α U 227 1,1 m α
91	Pa 215 14 ms α	Pa 216 105 ms α Pa 217 3,8 ms α Pa 218 113 μs α	Pa 219 53 ns α Pa 220 0,78 μs α	Pa 221 5,9 μs α Pa 222 4,3 ms α	Pa 223 6,5 ms α Pa 224 0,95 s α	Pa 225 1,8 s α Pa 226 1,8 m α EC
90	Th 214 0,10 s α	Th 215 1,2 s α Th 216 26,0 ms α Th 217 237 μs α	Th 218 0,1 μs α Th 219 1,05 μs α	Th 220 9,7 μs α Th 221 1,68 ms α	Th 222 2,24 ms α Th 223 0,66 s α	Th 224 1,04 s α Th 225 8,72 m α EC
89	Ac 213 0,80 s α	Ac 214 8,2 s α EC Ac 215 0,17 s α EC Ac 216 0,44 ms α	Ac 217 69 ns α Ac 218 1,1 μs α	Ac 219 11,8 μs α Ac 220 26 ms α	Ac 221 52 ms α Ac 222 5,0 s α	Ac 223 2,10 m α EC Ac 224 2,9 h α EC
88	Ra 212 13,0 s α EC ?	Ra 213 2,74 m α EC Ra 214 2,46 s α EC Ra 215 1,67 ms α	Ra 216 0,18 μs α Ra 217 1,6 μs α	Ra 218 25,6 μs α Ra 219 10 ms α	Ra 220 23 ms α Ra 221 28 s α	Ra 222 38 s α Ra 223 11,43 d α
87	Fr 211 3,10 m α EC	Fr 212 20,0 m α EC Fr 213 34,6 s α EC Fr 214 5,0 ms α	Fr 215 0,09 μs α Fr 216 0,70 μs α	Fr 217 16 μs α Fr 218 1,0 ms α	Fr 219 21 ms α Fr 220 27,4 s α β^-	Fr 221 4,9 m α Fr 222 14,2 m β^- α ?
86	Rn 210 2,4 h α EC	Rn 211 14,6 h α EC Rn 212 24 m α Rn 213 19,5 ms α	Rn 214 0,27 μs α Rn 215 2,3 μs α	Rn 216 45 μs α Rn 217 0,54 ms α	Rn 218 35 ms α Rn 219 3,96 s α	Rn 220 55,6 α Rn 221 25 m α β^-
85	At 209 5,4 h EC α	At 210 8,3 h EC α At 211 7,22 h α EC At 212 314 ms α	At 213 0,11 μs α At 214 0,56 μs α	At 215 0,1 ms α At 216 0,3 ms α	At 217 32,3 ms α β^- At 218 ~ 2 s α β^-	At 219 0,9 m α β^- At 220 3,71 m α β^-
84	Po 208 2,898 a α EC	Po 209 102 a α EC Po 210 138,38 d α Po 211 0,516 s α	Po 212 0,3 μs α Po 213 4,2 μs α	Po 214 164 μs α Po 215 1,78 ms α β^-	Po 216 0,15 s α Po 217 1,53 s α β^-	Po 218 3,05 m α β^- Po 219 > 300 ns β^- ?
83	Bi 207 31,55 a EC β^+	Bi 208 $3{,}68 \cdot 10^5$ a EC Bi 209 100 Bi 210 5,013 d β^- α	Bi 211 2,17 m α β^- Bi 212 60,60 m β^- α	Bi 213 45,59 m β^- α Bi 214 19,9 m β^- α	Bi 215 7,7 m β^- Bi 216 2,17 m β^-	Bi 217 98,5 s β^- Bi 218 33 s β^-
82	Pb 206 24,1 Pb 207 22,1 Pb 208 52,4 Pb 209 3,253 h β^-	Pb 210 22,3 a β^- Pb 211 36,1 m β^- Pb 212 10,64 h β^-	Pb 213 10,2 m β^- Pb 214 26,8 m β^-			
81	Tl 205 70,48 Tl 206 4,20 m β^- Tl 207 4,77 m β^- Tl 208 3,053 m β^-	Tl 209 2,16 m β^- Tl 210 1,30 m β^- Tl 211 > 300 ns β^- ?	Tl 212 > 300 ns β^- ?			
80	Hg 204 6,87 Hg 205 5,2 m β^- Hg 206 8,15 m β^- Hg 207 2,9 m β^-	Hg 208 ~ 42 m β^- Hg 209 35 s β^- Hg 210 > 300 ns β^- ?				

Z

176

95	Am 232 1,31 m EC α	Am 233 3,2 m EC α	Am 234 2,32 m EC α	Am 235 10,3 m EC α	Am 236 3,6 m EC α	Am 237 73,0 m EC α	Am 238 1,63 h EC α	Am 239 11,9 h EC α	Am 240 50,8 h EC α	Am 241 432,2 a α sf	Am 242 16 h β^- EC	Am 243 7370 a EC sf
Pu 230 1,7 m α EC	Pu 231 8,6 m α EC	Pu 232 34,1 m α EC	Pu 233 20,9 m EC α	Pu 234 8,8 h α EC	Pu 235 25,3 m EC α	Pu 236 2,858 a α sf	Pu 237 45,2 d α	Pu 238 87,74 a α sf	Pu 239 $2{,}411 \cdot 10^4$ a α sf	Pu 240 6563 a α sf	Pu 241 14,35 a β^- α	Pu 242 $3{,}750 \cdot 10^5$ a α sf
Np 229 4,0 m α EC	Np 230 4,6 m EC α	Np 231 48,8 m EC α	Np 232 14,7 m EC	Np 233 36,2 m EC α	Np 234 4,4 d EC	Np 235 396,1 d EC α	Np 236 $1{,}54 \cdot 10^5$ a EC α β^-	Np 237 $2{,}144 \cdot 10^6$ a α	Np 238 2,117 d β^-	Np 239 2,355 d β^-	Np 240 65 m β^-	Np 241 13,9 m β^-
U 228 9,1 m α EC	U 229 58 m α EC	U 230 20,8 d α	U 231 4,2 d EC α	U 232 68,9 a α	U 233 $1{,}592 \cdot 10^5$ a α	U 234 0,0054 $2{,}455 \cdot 10^5$ a α sf	U 235 0,7204 $7{,}038 \cdot 10^8$ a α sf	U 236 $2{,}342 \cdot 10^7$ a α sf	U 237 6,75 d β^-	U 238 99,2742 $4{,}468 \cdot 10^9$ a α sf β^-	U 239 23,5 m β^-	U 240 14,1 h β^-
Pa 227 38,3 m α EC	Pa 228 22 h EC α	Pa 229 1,50 d EC α	Pa 230 17,4 d EC α β^-	Pa 231 $3{,}276 \cdot 10^4$ a α	Pa 232 1,31 d β^- EC	Pa 233 27,0 d β^-	Pa 234 6,70 h β^-	Pa 235 24,2 m β^-	Pa 236 9,1 m β^-	Pa 237 8,7 m β^-	Pa 238 2,3 m β^-	Pa 239 1,8 h β^-
Th 226 31 m α	Th 227 18,72 d α	Th 228 1,913 a α	Th 229 7880 a α	Th 230 $7{,}54 \cdot 10^4$ a α	Th 231 25,5 h β^-	Th 232 100 $1{,}405 \cdot 10^{10}$ a α sf	Th 233 22,3 m β^-	Th 234 24,10 d β^-	Th 235 7,1 m β^-	Th 236 37,5 m β^-	Th 237 5,0 m β^-	Th 238 9,4 m β^-
Ac 225 10,0 d α	Ac 226 29 h β^- α EC	Ac 227 21,773 a β^- α	Ac 228 6,13 h β^- α	Ac 229 62,7 m β^-	Ac 230 122 s β^-	Ac 231 7,5 m β^-	Ac 232 119 s β^-	Ac 233 145 s β^-	Ac 234 44 s β^-			148
Ra 224 3,66 d α	Ra 225 14,8 d β^-	Ra 226 1600 a α	Ra 227 42,2 m β^-	Ra 228 5,75 a β^-	Ra 229 4,0 m β^-	Ra 230 93 m β^-	Ra 231 103 s β^-	Ra 232 4,2 m β^-	Ra 233 30 s β^-	Ra 234 30 s β^-		
Fr 223 21,8 m β^- α	Fr 224 3,3 m β^-	Fr 225 4,0 m β^-	Fr 226 48 s β^-	Fr 227 2,47 m β^-	Fr 228 39 s β^-	Fr 229 50,2 s β^-	Fr 230 19,1 s β^-	Fr 231 17,5 s β^-	Fr 232 5 s β^-	146		
Rn 222 3,825 d α	Rn 223 23,2 m β^-	Rn 224 1,78 h β^-	Rn 225 4,5 m β^-	Rn 226 7,4 m β^-	Rn 227 22,5 s β^-	Rn 228 65 s β^-		144				
At 221 2,3 m β^-	At 222 54 s β^-	At 223 50 s β^-		140		142						
Po 220 > 300 ns β^- ?		138										
136												

N



Bi 209 100	Stabiili nuklidi
Ra 217 1,6 µs α	Alfa-aktiivinen nuklidi
Th 234 24,10 d β^-	Beetamiinusaktiivinen nuklidi
Bi 207 31,55 a EC β^+	Beetaplusaktiivinen tai elektronisieppauksella hajoava nuklidi
Pu 240 6563 a α sf	Alfa-aktiivinen nuklidi, joka voi hajota spontaanilla fissiolla
Pa 230 17,4 d EC α β^-	Nuklidi, jolla on useampia hajoamistapoja
U 235 0,7204 $7{,}038 \cdot 10^8$ a α sf	Radioaktiivinen nuklidi, joka on peräisin aurinkokunnan syntyajoilta

Valokuvien lähteet

Kannen kuvat:

ylh. Suomen Kuvapalvelu/SPL/Lawrence Livermore Laboratory

alh. Cern

s. 6 ylh. Suomen kuvapalvelu/SPL/Dr. Linda Stannard

s. 7 ylh. vas. WSOY

s. 7 ylh. oik. Suomen kuvapalvelu/SPL/Simon, Fraser /RVI Medical Physics, Newcastle

s. 7 alh. vas. WSOY

s. 7 alh. oik. Suomen kuvapalvelu/SPL/Frs. A. Yazdani & D.J.Hornbaker

s. 8 Suomen kuvapalvelu/SPL/Imperial College, Dept. of Physics

s. 9 ylh. Timo Suvanto

s. 9 alh. Suomen kuvapalvelu/SPL/Charles D. Winters

s. 10 Timo Suvanto

s. 13 Suomen kuvapalvelu/SPL/Agema Infrared Systems

s. 15 Timo Suvanto

s. 17 Timo Suvanto

s. 18 Suomen kuvapalvelu/SPL/Dan Sams

s. 28 ylh. Suomen kuvapalvelu/SPL/Veeco/Digital Instruments

s. 28 alh. Suomen Kuvapalvelu/SPL

s. 29 Suomen Kuvapalvelu/SPL

s. 30 WSOY

s. 33 Suomen Kuvapalvelu/SPL

s. 35 Suomen kuvapalvelu/Corbis/Bettmann

s. 36 Timo Suvanto

s. 38 ylin Lehtikuva/Phototake/ISM

s. 38 kesk. WSOY

s. 38 alin WSOY

s. 44 WSOY

s. 46 WSOY

s. 51 WSOY

s. 55 WSOY

s. 57 WSOY

s. 58 ylh. Suomen kuvapalvelu/SPL/Andrew Lambert Photography

s. 58 alh. Suomen kuvapalvelu/SPL/Laguna Design

s. 59 Timo Suvanto

s. 60 ylh. vas. Timo Suvanto

s. 60 ylh. oik. Suomen kuvapalvelu/Corbis/Pat Jerrold

s. 60 alh. vas. Suomen kuvapalvelu/SPL/Mauro Fermariello

s. 60 alh. oik. Timo Suvanto

s. 61 ylh. vas. Lehtikuva/Phototake/Yoav Levy

s. 61 ylh. oik. WSOY Oppimateriaalit Oy/Minttu Lehtovaara

s. 62 ylh. oik. Suomen Kuvapalvelu/SPL/Maximilian Stock Ltd

s. 62 kesk. Suomen Kuvapalvelu/SPL/Alexander Tsiaras

s. 62 alh. Suomen Kuvapalvelu/SPL/Volker Steger

s. 70 WSOY

s. 71 Suomen Kuvapalvelu/Corbis/Bettmann

s. 72 Suomen Kuvapalvelu/SPL/American Institute of Physics/University of Chicago

s. 82 Suomen kuvapalvelu/SPL/Wellcome Dept. of Cognitive Neurology

s. 84 ylh. vas. Suomen Kuvapalvelu/SPL/James King-Holmes

s. 84 ylh .oik. Timo Suvanto

s. 84 alh .vas. Timo Suvanto

s. 84 alh. oik. Timo Suvanto

s. 85 Timo Suvanto

s. 87 Cern

s. 96 WSOY

s. 98 Lehtikuva/EPA/Remigiusz Sikora

s. 99 Säteilyturvakeskus/Tiina Jutila

s. 100 ylh. TVO/Korpi-Hallila

s. 100 alh. Rados

s. 102 Suomen kuvapalvelu/SPL/Simon, Fraser /RVI Medical Physics, Newcastle

s. 103 vas. Lehtikuva/Reuters/Metropolitan police

s. 103 oik. Timo Suvanto

s. 104 Säteilyturvakeskus/Tiina Jutila

s. 110 Suomen Kuvapalvelu/Corbis/Karen Kasmauski

s. 116 ylh. Corbis/Royalty free

s. 116 alh. Suomen Kuvapalvelu/SPL/US Department of Energy

s. 120 Suomen kuvapalvelu/Corbis/Bettmann

s. 121 ylh. SOHO

s. 121 alh. vas. Suomen Kuvapalvelu/SPL/AATB/Royal Observatory

s. 121 alin Suomen kuvapalvelu/SPL

s. 122 WSOY

s. 124-125 Helsingin Sanomat

s. 130 Cern

s. 134 alh. vas. Suomen kuvapalvelu/SPL/Prof.D.Skobeltzyn

s. 134 kesk. Suomen kuvapalvelu/SPL/David Parker

s. 135 Suomen kuvapalvelu/SPL/David Parker

s. 148 Photocourtesy of Ernest Orlando Lawrence/Berkeley National Laboratory

s.151 Suomen kuvapalvelu/SPL/David Parker

s. 153 Suomen kuvapalvelu/SPL/Julian Baum

s. 154 ylh. Suomen kuvapalvelu/SPL/NASA/ESA/STSCI/H.Ford ET AL

s.154 alh. Anita Kokkila

s. 155 Suomen Kuvapalvelu/SPL/RIA Novosti

s. 157 Timo Suvanto

s. 164 kesk. vas. NASA Goddard Space Flight Center

s. 164 ylh. oik. Suomen kuvapalvelu/SPL/NASA

s. 164 kesk. oik. ESA